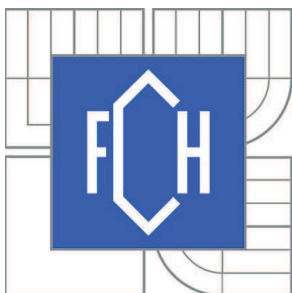


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

MOŽNOSTI VYUŽITÍ KOTELNÍ STRUSKY Z VYSOKOTEPLOTNÍHO SPALOVÁNÍ UHLÍ

THE POSSIBILITIES OF UTILIZATION OF SCOIRA FROM HIGH-TEMPERATURE COMBUSTION
OF COAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

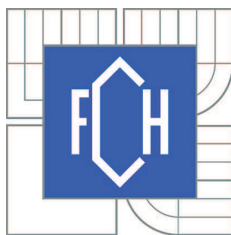
JIŘÍ DOBEŠ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	FCH-BAK0748/2012	Akademický rok: 2012/2013
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Jiří Dobeš	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.	
Konzultanti:		

Název bakalářské práce:

Možnosti využití kotelní strusky z vysokoteplotního spalování uhlí

Zadání bakalářské práce:

Návrh oblastí využití kotelní strusky, především možné aplikace ve stavebním odvětví příbuzných oborech.

Návrh a testování vhodných úprav kotelní strusky (škváry).

Testování a ověření použitelnosti tohoto alternativního materiálu v konkrétních aplikacích např. v kompozitních dílcích.

Měření fyzikálních a chemických vlastností připravených vzorků. Vyhodnocení naměřených dat, sepsání závěrečné práce.

Termín odevzdání bakalářské práce: 10.5.2013

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Jiří Dobeš
Student(ka)

Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2013

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi využití kotelní strusky (škváry) v oblasti stavebního odvětví a příbuzných oborů. V průběhu práce je sledován vliv množství přidané kotelní strusky na vlastnosti past a malt na bázi portlandského cementu. Dále byl sledován vliv přídavku superplastifikátoru. Na připravených vzorcích byly testovány mechanické vlastnosti, jako pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku v časové závislosti ve standardním vlhkém uložení. Tato získaná data byla dále zpracována a vyhodnocována.

Abstract

This thesis deals with the possibility of usage boiler slag in construction industry and related fields. Within this study is observed the influence of the amount of added boiler slag on the properties of pastes and mortars based on Portland cement. The influence of the addition of superplasticizer was further studied as well. The prepared samples were tested for mechanical properties such as tensile strength, bending and compression strength in the time dependence of the standard wet storage. The obtained data were further processed and evaluated.

Klíčová slova

kotelní struska, superplastifikátor, mechanické vlastnosti, selektivní katalytická redukce, cement

Keywords

Boiler slag, superplasticizer, mechanical properties, selective catalytic reduction, cement

Citace

DOBEŠ, J. *Možnosti využití kotelní strusky z vysokoteplotního spalování uhlí*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Opravila, Ph.D. a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně ocitoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
Jiří Dobeš

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Tomáši Opravilovi, Ph.D. za pomoc a odborné rady při vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval projektu Centra materiálového výzkumu na FCH VUT v Brně, CZ.1.05/2.1.00/01.0012, za jehož podpory tato bakalářská práce vznikla.

OBSAH

1	Úvod.....	8
2	Teoretická část.....	9
2.1	Spalování uhlí.....	9
2.2	Druhy spalování	10
2.2.1	Vysokoteplotní spalování	10
2.2.2	Fluidní spalování	10
2.3	Snižování emisí síry	11
2.3.1	Odsiřování uhlí	11
2.3.2	Odsiřování spalin.....	11
2.3.2.1	Suché způsoby odsiřování	12
2.3.2.2	Polosuché metody	12
2.3.2.3	Mokrý metody	13
2.4	Odstraňování NO _x	13
2.4.1	Primární	14
2.4.2	Sekundární.....	14
2.4.2.1	Selektivní katalytická redukce (SCR)	14
2.4.2.2	Selektivní nekatalytická redukce.....	15
2.5	Produkty spalování tuhých paliv a jejich využití	15
2.5.1	Vysokoteplotní popílek	15
2.5.2	Energosádrovec	16
2.5.3	Kotelní struska.....	16
2.6	Cement	17
2.6.1	Portlandský cement	18
2.6.2	Suroviny k výrobě slínku	18
2.6.3	Složení surovinové směsi	18
2.7	Superplastifikátory	19
3	Experimentální část.....	21
3.1	Příprava vzorků pro pevnostní zkoušku	21
3.2	Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku	21
3.3	Měření vlhkosti	22
3.4	Rentgenová difrakční analýza	22
3.5	Sítová analýza	23
4	Výsledky a diskuse.....	24
4.1	Použité suroviny	24
4.2	Měření vlhkosti	24
4.3	Rentgenová difrakční analýza	24
4.4	Vliv přísadky PC v kompozitech na bázi kotelní strusky	25
4.5	Vliv typu superplastifikátorů na mechanické vlastnosti směsí	28
4.6	Vliv přísadky SP ve směsích s obsahem portlandského cementu 30 %	30
4.7	Vliv přísadky SP ve směsích s obsahem portlandského cementu 40 %	32
4.8	Vliv přísadky SP ve směsích s obsahem portlandského cementu 50 %	34
5	Závěr.....	36
6	Použitá Literatura	37
7	Seznam použitých zkratk a symbolů	38

Seznam příloh	39
---------------------	----

1 ÚVOD

Vývoj stavebních hmot dnes klade důraz na šetrné používání a využití surovinových zdrojů. Z toho plyne zvýšená míra využití druhotných surovin, jako je například velkoobjemový odpadní materiál. Tento materiál lze do určité míry použít ve stavebnictví jako pojivo a plnivo, převážně pak na výrobu různých druhů betonů, umělých kameniv či cementu.

V České republice jsou v dnešní době hlavním energetickým zdrojem tuhá paliva. Zde je nejpoužívanější surovinou pro výrobu elektrické energie uhlí. Každá tepelná elektrárna v dnešní době ročně vyprodukuje a následně skladuje tisíce tun vedlejších energetických produktů. Příkladem jsou popílky a škvára z vysokoteplotního spalování. Toto množství každoročně narůstá. Jedná se o materiál, který je druhotnou surovinou. Jeho dosavadní použití spočívá převážně jen v rekultivaci půdy, či stavebním zásypům. Je tedy žádoucí pro tuto surovinu nalézt další využití.

Cílem této bakalářské práce bude příprava směsí za použití kotelní strusky a následná optimalizace jejího zastoupení v nich tak, aby směs byla ekonomicky nejvýhodnější, ale přitom dosahovala vhodných mechanických vlastností jako jsou pevnosti v tahu ohybem a v tlaku.

V teoretické části práce popisuje základy spalování uhlí. Dále pak technologiemi které zajišťují snížení škodlivých látek v pevných i plynných produktech spalování uhlí. V praktické části jsou popsány a vyhodnoceny provedené experimenty. Jsou zde sledovány především mechanické vlastnosti připravených vzorků.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Spalování uhlí

Uhlí je největším zdrojem energie pro výrobu elektrické energie na celém světě. Jako zdroj energie představuje uhlí přibližně 41% z celosvětové produkce energie. Jeho celosvětová spotřeba se snižuje, což lze pozorovat z tabulky č.1. Jen od roku 2007 se jeho spotřeba v České republice snížila z 58287002 tun na 49451002 tun, což činí 15,26% snížení. Tato skutečnost je ovšem způsobena snahou o využití alternativních paliv jako je biomasa apod.

Tabulka č.1. Spotřeba uhlí států za období mezi roky 2007 až 2011 v jednotkách 1000 tun
[1]

	2007	2008	2009	2010	2011
Severní Amerika	1099686	1088720	970516,6	1020522	972336,6
Japonsko	188314	184887	164651	186993	174954
Mexico	18672	15490,18	16248,13	17948,09	19621,56
Norsko	1193	1274	832	1243	1237
Polsko	135696	135093	127830	134146	138788
Portugalsko	4746	4160	4680	2705	3698
Rumunsko	40375	40345	35093	32610	37875
Srbsko	43225	44971	45717	44737	48129
Slovensko	8005	8158	7772	7634	7519
Slovinsko	5314	5237	4972	4955	5030
Španělsko	41862	25903	19493	14451	23116
Švédsko	3476	3003	2286	3086	3143
Švýcarsko	289	261	243	246	253
Turecko	98808	98735	98805	95919	102055
Velká Británie	63202	58515	48329	50251	49796
Česká republika	58287	54296	50990	51606	49451
Dánsko	7939	6871	6804	6519	5546
Rakousko	5596	5333	4119	4922	5120
Belgie	6650	6795	4696	4979	4031
Německo	255321	243018	224861	232201	232839

I když je uhlí neobnovitelný zdroj energie a z hlediska produkce tzv. skleníkových plynů není tak výhodný pro spalování jako např. zemní plyn, má ve světové energetice nezastupitelné místo. Zásoby uhlí jsou totiž rozloženy daleko rovnoměrněji než zásoby kapalných uhlovodíků a jejich životnost je řádově delší.[2]

Spalování uhlí je nejstarší, a také nejčastější možnost jeho využití. Spalovací proces je v podstatě exotermní reakcí uhlíku z uhlí s kyslíkem ze vzduchu. Probíhající reakce jsou tedy podobné příkladům v kapitole Zplynování uhlí a kromě tepla jsou produktem dokonalého spalování uhlí oxid uhličitý a vodní pára. Kromě toho ovšem odpad tvoří oxidy síry, dusíku a popílek vzniklé z nečistot uhlí.[2]

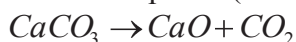
2.2 Druhy spalování

Průmyslové způsoby získávání energie z uhlí spočívají ve dvou typech spalování. Jedná se o klasické vysokoteplotní a fluidní spalování.

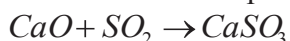
2.2.1 Vysokoteplotní spalování

Spalování tuhých paliv je jeden z hlavních zdrojů pro výrobu elektřiny. V konvenčních elektrárnách spalování paliva probíhá při teplotách mezi 1150 °C a 1750 °C. Proces je spojen se vznikem variabilního množství oxidu siřičitého, který musí být odstraněn ze spalin, kvůli ochraně životního prostředí (kyselé deště). Požadované odsiřovací jednotky jsou nákladné, a často není dostatek místa pro jejich instalaci, a to zejména ve stávajících elektrárnách. V elektrárnách Skupiny ČEZ jsou používány dvě neregenerativní metody odsiřování kouřových plynů z kotlů, a to mokrá metoda, při níž jsou spaliny vedeny přes mokrou vápencovou vypírku, a tzv. polosuchá metoda, při které jsou škodliviny ze spalin absorbovány na částicích vápenné suspenze a částice takto vzniklého produktu jsou následně vlivem tepla kouřových plynů usušeny. Kouřové plyny z elektrofiltrů, kde jsou zbaveny polévatého popílku s vysokou účinností, jsou zchlazeny ve výměníku plyn-plyn (rotační výměník typu Ljungstrom) a jsou zavedeny do procesu vypírky oxidů síry (absorbéru). V absorbéru dojde k reakci oxidů síry s uhličitánem vápenatým CaCO_3 (vápenec) za vzniku siřičitanu vápenatého (CaSO_3) a po dooxidování zavedeným vzduchem vznikne konečný krystalický síran vápenatý ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – sádrovec. Sádrovec je z absorbéru odčerpáván a zbavován vody až na požadovanou úroveň vhodnou pro jeho další zpracování. [3]

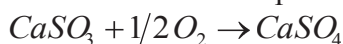
Rozklad vápence (uhličitán vápenatý)



Vznik siřičitanu vápenatého reakcí oxidů siřičitého a oxidu vápenatého



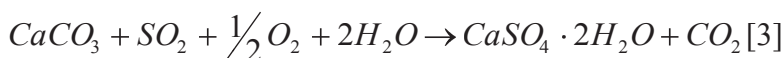
Oxidace siřičitanu vápenatého na špatně rozpustný bezvodý síran vápenatý



Hydratace síranu vápenatého, a tedy vznik energosádrovce



Celková balance reakcí



2.2.2 Fluidní spalování

Princip fluidního spalování byl poprvé vyzkoušen v USA začátkem 20.století (Milwaukee 1918) a byl výjimečně zkoušen i u parních lokomotiv a lodí.

Technologie spalování ve fluidní vrstvě byla vyvinuta ve 30.letech v chemickém průmyslu. Fluidní technologie umožňují co možná nejefektivněji redukovat vliv spalování uhlí na životní prostředí a posílit účinnost přeměny energie v uhelných elektrárnách a teplárnách. V zásadě existují fluidní ohniště atmosférická a tlaková.

Atmosférická jsou buď s bublinovou, nebo s cirkulující fluidní vrstvou. V průmyslových zemích je provozu okolo 200 těchto jednotek. Atmosférická fluidní ohniště se běžně využívají v uhelných elektrárnách. s výkonem bloku do 165 MWe. V Japonsku a v USA jsou ve výstavbě jednotky o výkonu až 350 MWe.

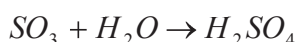
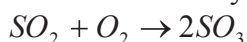
Tlaková fluidní ohniště jsou v pokročilém stádiu vývoje. Aplikují principy bublinové i cirkulující fluidní vrstvy. [4]

Jemně rozemleté uhlí (případně i jiné látky) smíšené se vzduchem nabývá nad fluidním rostem vlastností tekutin. Práškové uhlí má daleko větší povrch než stejný objem kusového uhlí, takže rychle a stejnoměrně shoří na jemný popel, vhodnou regulací teploty lze dosáhnout snížení nežádoucích zplodin, zejména NO_x . Protože vlastní hoření probíhá téměř okamžitě, dá se fluidní kotel dobře regulovat, a do směsi lze přidávat i další práškové látky, které na sebe váží například oxid siřičitý. Fluidní kotel dosahuje vysoké účinnosti (37 - 48 %), je to však zařízení poměrně složité, které se musí ze studeného stavu při najíždění postupně ohřívat až na provozní teplotu 850 °C. Při spalování uhlí je zpravidla před kotlem instalován drtič na uhlí, aby zrnitost na vstupu do kotle nepřesáhla 10 mm. Při zacházení s uhlím jsou potom třeba různá opatření, aby nedocházelo k samovznícení, k explozi uhelného prachu a podobně. Proto se používá ve středních a větších energetických provozech, kde se ale dnes tímto způsobem vyrábí asi 50 % světové elektrické energie.[3]

2.3 Snižování emisí síry

Jednou z nevýhod spalování uhlí je vznik škodlivých spalin jako jsou oxidy síry. Tento plyn pak v ovzduší reaguje a dává vzniku kyselým dešťům.

Rovnice vzniku kyselých dešťů [5]



Existují dvě metody, jak snižovat emise síry z tuhých paliv.

2.3.1 Odsiřování uhlí

Jedná se o odstranění síry již z uhlí. Byla vyvinuta metoda paroplynového cyklu odsiřování uhlí. Zde je možná především paroplynový cyklus.

Metoda paroplynového cyklu využívá toho, že odstranění sulfanu z plynu je technologicky velmi dobře zvládnuto při vysoké účinnosti a provozní spolehlivosti, stejně jako tlakové zplynění uhlí.[6]

Podstatou celého procesu je tlakové zplynění uhlí parou a vzduchem (příp. kyslíkem), běžné čištění a desulfurace vyrobeného plynu a snížení tlaku vyrobeného plynu v expanzní turbíně. Chemicky vázaná energie plynu se po spálení využije nejprve v plynové turbíně a v další fázi k výrobě páry, kterou je poháněna parní turbína. Elektrická energie se zde vyrábí ve třech stupních - s využitím energie expanzní turbíny, plynové turbíny a parní turbíny při maximálním využití tepelné energie (předehřev zplyňovacího a spalovacího vzduchu, využití páry za parní turbínou pro zplynění).[6]

Výhodou je mírně zvýšená účinnost výroby elektrické energie ve srovnání s klasickou tepelnou elektrárnou (při využití hnědého uhlí z SHD se předpokládá 36%) při dosažení ekologické nezávadnosti.[6]

2.3.2 Odsiřování spalin

Odsiřování spalin je dnes jedinou, ve velkém měřítku užívanou metodou snižování sirných emisí z energetiky. Je možno sem zařadit celou řadu metod, založených na nejrozličnějších chemických či fyzikálně-chemických principech. Zde použijeme rozdělení na procesy mokré, kde spaliny přicházejí do kontaktu s vodným roztokem nebo suspenzí aktivní látky, a suché,

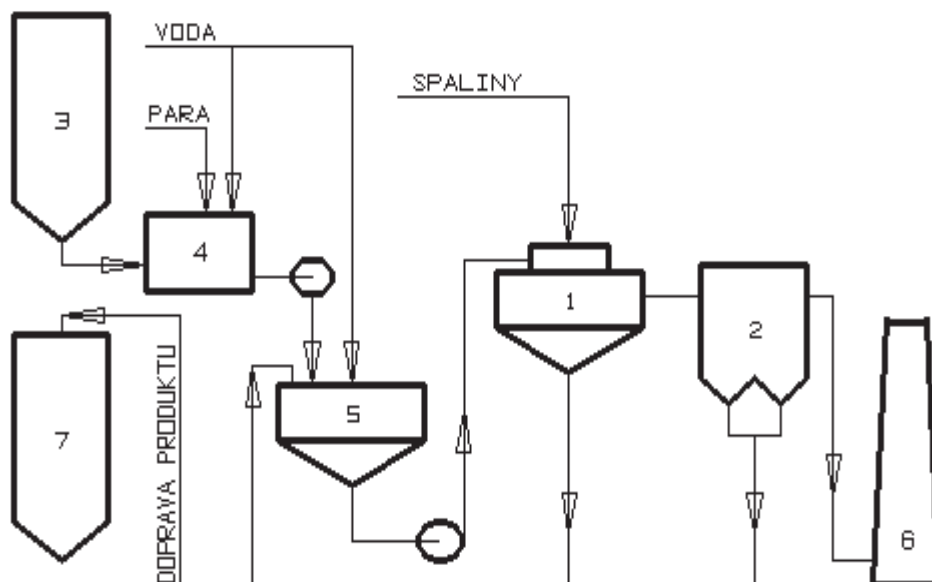
během nichž teplota spalin neklesá pod rosný bod vody. Mezi suché metody je možné zařadit i metody katalytické.[5,6]

2.3.2.1 Suché způsoby odsiřování

Metody spočívají v dávkování suchého sorbentu do uhlí nebo do spalin v libovolné fázi spalovacího procesu. Reakce probíhají při vysokých teplotách (reakce mezi tuhou fází a plynem). Lze aplikovat u klasických práškových kotlů i i fluidních spalovacích zařízení.

Rozprašovací absorpce

Tato metoda představuje přechod od suché aditivní metody k metodám mokrým. Jejím principem je nastřikování vápenného mléka do horkých spalin, během kterého dochází k absorpci oxidu siřičitého a částečné oxidaci na síran vápenatý a současně k odpaření vody, takže v následně zařazeném elektroodlučovači se zachycuje směs síranu a siřičitanu vápenatého s popílkem současně s nezreagovaným CaO. Pro zlepšení stupně zreagování CaO se část zachyceného úletu recirkuluje. Uvádí se 80% odsíření při aplikaci 1,8násobku stechiometrie. Schéma této technologie:[6]



Obr. č.1:

Schéma rozprašovací absorpce:

1. rozprašovací sušárna; 2. Elektrofiltr; 3. Zásobník CaO; 4. Hašení vápna; 5. Mísicí nádrž; 6. Komín; 7. zásobník produktu

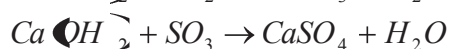
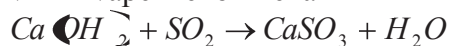
Nevýhodou rozprašovací absorpce je dosud nevyřešené využití produktu odsíření. Určitou perspektivu má metoda rozprašovací absorpce u malých a středních energetických jednotek, kde by nebylo ekonomické stavět nákladné mokré technologie a kde pravděpodobně lze počítat s mírnějšími emisními limity.

2.3.2.2 Polosuché metody

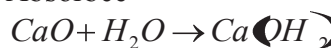
Polosuchá vápenná metoda - vodní suspenze hydroxidu vápenatého se vstřikuje do rozprašovací sušárny. Voda se adiabaticky odpaří a vznikne převážně CaSO_3 . Vzniklý produkt, podle technologie, obsahuje 1 až 50 % popílku, pak CaSO_3 , Ca(OH)_2 , CaSO_4 atd. Je

poměrně problematicky využitelným (nekvalitním) stavebním produktem (stěny skládek, důlní stěny apod.). Rovnice popisující polosuchou metodu: [6]

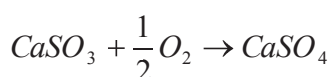
Vznik vápenného mléka



Absorbce



Oxidace

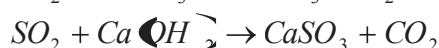
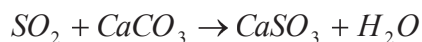


2.3.2.3 Mokré metody

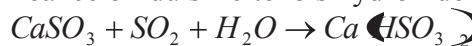
Jsou v současné době převažující odsiřovací metodou, zejména pak mokré vápencové vypírky. Zaujímají okolo 80 % podílu na trhu a používají se u velkých kotlů. Je to zapříčiněno vysokou účinností SO_2 , nízkými provozními náklady a spolehlivostí.

Principem mokrých vápno-vápencových metod je vázání oxidu siřičitého do vodné suspenze uhličitanu nebo hydroxidu vápenatého a následná oxidace vzniklého siřičitanu na síran vápenatý, který se odděluje a deponuje nebo zpracovává na sádku.

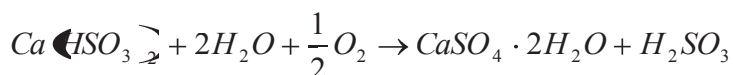
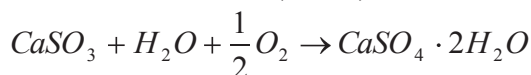
Reakce oxidu siřičitého s uhličitánem vápenatým



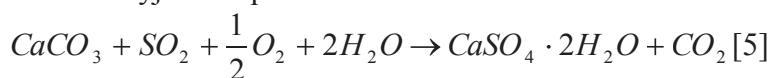
Reakce oxidu siřičitého s hydroxidem vápenatým



Oxidace $CaSO_3$ a $Ca(HSO_3)_2$



Sumární vyjádření procesu:



2.4 Odstraňování NO_x

Pod pojmy oxidy dusíku nejčastěji rozumíme oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO_2 . Oba oxidy se označují sumárním vzorcem NO_x . Vedle nich se mohou v malém množství vyskytovat i další oxidy dusíku, jimiž jsou N_2O , N_2O_3 a N_2O_5 . Oxidy dusíku vznikají při spalování paliv a při dalších chemických procesech. Jsou – li uváděny pod pojmem NO_x , pak se obvykle vyjadřuje jejich koncentrace v přepočtu na oxid dusičitý NO_2 .

Při spalování paliv ve stacionárních zařízeních se tvoří především NO , jehož podíl na celkovém obsahu NO_x bývá 90 – 99%. U tuhých paliv činí obsah NO_2 1-5 %. V této podobě se vypouštějí komínem. Po ochlazení spalin v kouřové vlečce se NO rychle mění na NO_3 , který s vodní parou reaguje za vzniku HNO_3 a HNO_2 . Tyto látky jsou pak obsazeny v kyselých deštích. Za spoluúčasti slunečního světla a uhlovodíkových radikálů se rovněž tvoří

sekundární znečištění ovzduší, jímž je fotochemický smog. Oxidy dusíku se tvoří všude, kde jsou v průmyslových procesech potřebné vysoké teploty. Existují tři mechanismy tvorby oxidu dusíku: termické, palivové, promptní.[7]

Metody zneškodňování NO_x

Technicky ke snižování oxidu dusíku lze rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří opatření primární, která vedou k řízení spalovacího procesu zajišťujícímu minimalizaci tvorby NO_x. Druhou skupinu tvoří sekundární opatření zabezpečující snižování emisí již vzniklých NO_x ve spalínách.

2.4.1 Primární

Primární metody spočívají v úpravě spalovacího procesu s cílem potlačit vznik NO_x. Tato opatření směřují k úpravě provozu nebo projektovaných parametrů spalovacího zařízení takovým způsobem, aby se tvorba oxidu dusíků snížila, nebo aby se již vytvořené oxidy dusíku změnily uvnitř kotle ještě před jejich vypuštěním. [8]

Jedná se o následující metody:

Nestechiometrické spalování

Recirkulace spalín

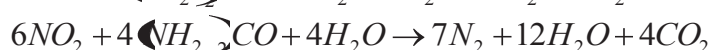
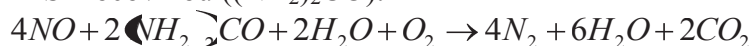
Hořáky na nízký obsah NO_x

Hořáky na tuhá paliva

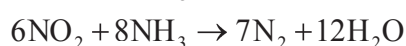
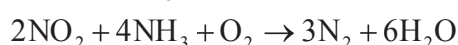
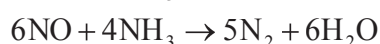
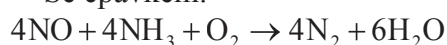
2.4.2 Sekundární

Sekundární metody jsou technikami koncového čištění sloužící ke snižování oxidů dusíků, které se již vytvořily. Hlavními sekundárními opatřeními, která se využívají jsou selektivní katalytická redukce [SCR] a selektivní nekatalytická redukce [SNCR]. Tyto metody jsou na bázi injektáže čpavku, čpavkové vody, močoviny nebo dalších sloučenin, které reagují s NO_x ve spalínách a redukují je na molekulární dusík. Při těchto metodách jsou reakce prováděny za přítomnosti kyslíku dle následujících rovnic. [8]

S močovinou ((NH₂)₂CO):



Se čpavkem:



2.4.2.1 Selektivní katalytická redukce (SCR)

Metoda selektivní katalytické redukce je nejrozšířenější metodou k redukci oxidů dusíku ve výstupních plynech z velkých spalovacích zařízení. Díky přítomnosti katalyzátoru dosahuje SCR vyšších stupňů konverze (80 až 90 %) a to při nižší teplotě, která závisí na použitém katalyzátoru. Používají se:

- Drahé kovy pro nízké teploty 177 – 288°C
- V₂O₅, TiO₂ pro teploty 260 – 427°C

- Zeolity (vysoce porézní, krystalické, přírodní nebo syntetické aluminosilikáty] pro teploty 455 – 594°C

Hlavní složky katalyzátoru pro SCR jsou oxidy titanu (TiO_2) vanadu (V_2O_5), wolframu (WO_3) a molybdenu (MoO_3).

Nevýhoda selektivní katalytické redukce se týká úniku čpavku. K tomu dochází následkem neúplné reakce NH_3 s NO_x , když spolu se spalinami opouštějí reaktor malá množství čpavku. Tento jev je známý, jako strhávání čpavku. Z dalších nevýhod této metody je, že katalytický způsob čištění spalin NO_x je výrazně dražší než způsob nekatalytický. Vyžaduje odloučení tuhých prachových částic a sloučenin ovlivňující funkci katalyzátoru (katalytické jedy, stabilizátory).[8]

Hlavní výhody technologie selektivní katalytické redukce jsou následující:

- Konverze NO_x nevytváří žádné vedlejší složky čištění
- Emise NO_x se mohou snížit o 90% nebo více[8]

2.4.2.2 *Selektivní nekatalytická redukce*

Metoda selektivní nekatalytické redukce (SNCR) je dalším sekundárním opatřením ke snižování již vytvořených oxidů dusíku ve spalinách spalovací jednotky. Provozuje se bez katalyzátoru při teplotách mezi 850°C až 1100°C. Toto teplotní rozmezí je značně závislé na použitém reakčním činidle (čpavek, čpavková voda, močovina, kyselina kyanurová). [8]

V případě zavádění činidla ve formě kapaliny je důležitým faktorem i velikost kapek. Malé kapky se rychle odpaří a reakce může proběhnout nad optimální teplotou, velké kapky se naopak opožďují déle a po jejich odpaření reakce nastane při nižší teplotě, při které uniká nezreagovaný amoniak se spalinami.[7]

Reakce oxidu dusíku se čpavkem nebo močovinou na vodu a dusík značně závisí na teplotě a době prodlevy v potřebném teplotním rozmezí, stejně jako na poměru čpavku a NO_x . Reakce probíhá při teplotách 800 – 1100°C.

Jednotlivá činidla mají své určité přednosti i nevýhody. Kapalný amoniak musí být skladován v tlakových nádržích a musí být dodržována přísná bezpečnostní opatření. Stejně tak to platí pro amoniakální vodu – roztok amoniaku ve vodě. Předností močoviny je, že nezapáchá, je rozpustná ve vodě a lze ji snadno přechovávat jako roztok v beztlakých nádržích. [7]

Účinnost procesu SNCR bývá okolo 50 – 65%. Investiční náklady na SNCR činí cca 20% nákladů na SCR. Únik NH_3 se spalinami by neměl překračovat hodnotu 50 mg/m³. [7]

2.5 Produkty spalování tuhých paliv a jejich využití

Produktem spalování uhlí je struska a popílek. Popílek odchází z kotle spolu se spalinami vrchní částí kotle, jedná se o velmi jemný prášek o nízké hmotnosti. Na druhé straně struska, která vzniká spékáním popílku má větší hmotnost, proto padá do spodní části kotle kde je jímána. Spaliny ovšem obsahují nejen popílek, ale i oxidy dusíku a síry, které je potřeba odstranit, než se dostanou do ovzduší. Jednou z metod odstranění SO_3 je použití suspenze $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Za vzniku CaSO_4 , také zvaného energosádrovec.

2.5.1 Vysokoteplotní popílek

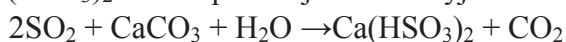
Popílek nalézá široké uplatnění ve stavebnictví, a při výrobě stavebních hmot. Ve stavebnictví při přípravě betonů a malt, přičemž popílek může působit jako aktivní či neaktivní složka (přispívá či nepřispívá k procesu tvrdnutí). Při výrobě stavebních hmot v

největší míře při výrobě cementu, dále pak pórobetonu, ale také při výrobě umělého kameniva (za studena, nebo při vysokých teplotách spékáním).

Popílek se využívá ve stavebnictví, při přípravě malt a betonů, přičemž popílek může působit jako aktivní i neaktivní složka. Využívá se při výrobě cihel, kde popílek tvoří až 90 % materiálu a výroba je prováděna za studena. Popílek se také přidává do asfaltu. Jeho využití ovšem nalézáme také při výrobě umělého kameniva. Zde jsou možné dva způsoby výroby. Technologie za studena nebo za horka. Minoritní část popílku zachyceného v elektrofiltru má vlastnosti využitelné pro účely čištění odpadních vod. Tato část se odseparuje a použije se jako náplň do filtrů, přičemž jsou dosahovány překvapivě vysoké účinnosti při čištění některých odpadních vod. Životnost náplně filtrů je 10-20 let. Čištění je vysoce účinné zejména na BSK (biochemické čištění kyslíku), tenzidy, patogenní bakterie, nepolární látky, těžké kovy a polychlorované bifenylly.

2.5.2 Energosádrovec

Produktem odsiřování spalin mokrou vápencovou metodou je energosádrovec. Principem odsiřování je vypírání plynného oxidu siřičitého (SO_2), obsaženého ve spalinách vodní vápencovou suspenzí ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) za vzniku roztoku hydrogensířičitanu vápenatého $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$. Tento proces je možné vyjádřit souhrnnou chemickou rovnicí:



Energosádrovec je pojem používaný pouze pro sádrovec vzniklý v odsiřovacím zařízení, aby se odlišil od sádrovce, který se v přírodě vyskytuje jako nerost a je také těžen pro průmyslové využití. Energosádrovec je však mnohem čistší než sádrovec přírodní.

Používá se v cementárnách jako plnohodnotná náhrada za přírodní sádrovec jako přísada pro regulaci tuhnutí cementu. Dále je využíván pro výrobu sádry a sádrokartonových desek. Energosádrovec se po odvodnění zahřeje na teplotu kolem 100°C , neboli teplotu kalcinace, přičemž vzniká běžná sádra, tzv. (α -sádra, která může být samostatně expedována nebo bývá využita bezprostředně při výrobě sádrokartonových desek.

Je-li sádrovec kalcinován za zvýšeného tlaku 0,4-0,5 MPa a teploty 120°C až 130°C , vzniká tzv. α -sádra, která má výrazně lepší vlastnosti zejména z hlediska pevnosti a mrazuvzdornosti než běžná sádra. Ve směsi se struskou může být využívána dokonce i na vnější stavby jako téměř plnohodnotná náhrada betonu. Také je využívána jako těsnicí vrstva skládky. Úpravou receptury stabilizátu a jeho ukládáním za určitých podmínek lze připravit vrstvu, která splňuje všechny požadavky na těsnicí materiál pro skládky. Vrstva stabilizátu upravená pro těsnicí účely dosahuje propustnosti vůči vodě řádu 10^{-9} - 10^{-11} m/s. Vytvořenými chemickými vazbami, zhutněním vrstvy a nízkou propustností téměř nedochází k uvolňování případných škodlivin z vrstvy do životního prostředí. Je však nutno vytvořit vrstvu dostatečně silnou a pevnou, aby po zatížení vrstvou odpadu nedošlo k jejímu popraskání.[10]

2.5.3 Kotelní struska

Během spalování uhlí, pokud je teplota dostatečně vysoká, se část výsledného popela roztaví a dojde tak ke vzniku kotelní strusky. Kotelní struska sestává z černých částic s hladkým, sklovitým vzhledem. Velikost částic se pohybuje v rozmezí hrubého písku až jemného šterku. Na množství vzniklé strusky výrazně závisí typ kotle. Standartní kotel obvykle produkuje 50% vedlejších produktů ve formě kotelní strusky. Oproti tomu cyklonový kotel produkuje 70 – 80% kotelní strusky. Složení kotelní strusky závisí na typu uhlí a v menší míře i na místě původu uhlí. Hnědé uhlí má obecně vyšší procento vápníku než černé

uhlí nebo antracit. Také sírany jsou povětšinou zastoupeny v množství menším, než 1%. To ovšem platí v případě, že uhlí neobsahuje pyrit. Obecně však struska obsahuje tyto společné fáze:[12]

Mullit (Al_2SiO_5), oxid křemičitý, oxid železitý, oxid vápenatý s příměsemi vápníku hořčíku a sulfidů.

Kotelní struska vykazuje dobré fyzikální vlastnosti: vysoká oděruvzdornost, chemická inertnost a jednotná hustota. To nabízí velké uplatnění v široké škále průmyslových aplikací.

Je využívána jako abrazivní materiál. Díky kubickému tvaru zrna a ostrohrannosti podobné střepům zvyšuje svou řeznou rychlost a účinnost, takže je vhodná pro široké spektrum použití pro otryskání. Díky jejímu složení také nehrozí silikóze oproti křemičitému písku, neboť obsahuje méně než 1% krystalického oxidu křemičitého, který je jinak původcem vzniku křemenného prachu. Šetří tedy spotřebu přírodních materiálů, které by jinak byly použity. [11,12]

Další využití nalézá jako náhradní přísada za písek do asfaltu. Díky výborné odolnosti proti klimatickým a povětrnostním jevům, také díky svému ostrohrannému povrchu a černé barvě zlepšuje protismykové vlastnosti a vzhled povrchu vozovky.

Struska bývá také aplikována jako posypový materiál pro zimní údržbu komunikací. Často se struska mísí s posypovou solí, kde jí její černá barva a ostré hrany dávají výhodu oproti typickému písku.

Struska uplatňuje své využití v dalších odvětvích, jako je součást podkladů vozovek, dále pak při výstavbě násypů, zásypů a obsypů.[12,]

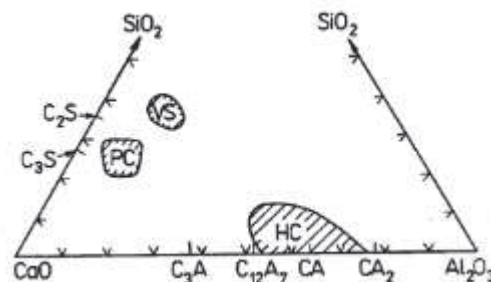
2.6 Cement

Cement je hydraulické práškové pojivo, jehož účinnými složkami jsou sloučeniny CaO a SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 , popřípadě jiné sloučeniny podobného typu. Podle chemického hlediska lze cement rozdělit do tří skupin:

- Křemičitanové cementy, jehož hlavním zástupcem je portlandský cement.
- Hlinitanové cementy, obsahující větší množství hlinitanů vápenatých
- jiné cementy, jako je železitanový, chromitanový a další[13]

Z výše uvedených je nejvýznamnější portlandský cement. Co do složení jsou příbuzné cementy z přírodních nebo umělých surovin (např. ze strusky). Jsou ovšem vyráběny jinou metodou a také mají odlišný mechanismus tuhnutí. Využití hlinitanového cementu je výhradně pro žárobetony. Z toho důvodu je vyráběn jen v omezeném rozsahu. Cementy poslední skupiny jsou vyjma cementů hlinitanoželezitanových bez většího technického využití.[14]

Cementy prvních dvou skupin patří složením do soustavy $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ s obsahem malého množství jiných minoritních složek. Neboť obsah Fe_2O_3 je (kromě železitanového cementu Ferrariho) značně nízký, je možné oblasti složení cementů znázornit v tříložkovém systému $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (obr č.1). Složení, která se nachází mimo znázorněné oblasti mají omezené nebo prakticky nevyužitelné pojivové vlastnosti.[13]



Obr.č.2

Oblasti složení portlandského cementu, bazické vysokopecní stursky a hlinitanového cementu; $C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3$ [13]

2.6.1 Portlandský cement

V pojmu portlandský cement je obsažena řada druhů s modifikovaným složením. Společnou charakteristikou jsou:

- výrobní postup, který záleží na výpalu směsi surovin do slinutí. Vzniká slínek, který se jemně pomele a vznikne tak portlandský cement (zkráceně p – cement)
- Mineralogické (fázové složení), které vzniká vysokoteplotními reakcemi. Produktem je směs obsahující křemičitany, v menší míře hlinitany a železitany vápníku. Chemické složení průmyslově vyráběného portlandského cementu se pohybuje v těchto mezích: 62 – 67% CaO, 18 – 24 SiO₂, 4 – 8% Al₂O₃, 1,5 – 4,5% Fe₂O₃, 0,5 – 4% MgO, 0,01 – 1,5% K₂O, 0,1 – Na₂O (% hm.).[13]

Překročení daných mezí složení se uplatňuje u speciálních cementů, kde jsou vyžadovány jiné vlastnosti. Příkladem mohou být bílé cementy, obsahující nižší obsah Fe₂O₃ a chemicky odolnější cementy mající nižší obsah Al₂O₃. [13]

2.6.2 Suroviny k výrobě slínku

Do základních surovin k výrobě slínku patří vápenec, hlíny nebo jíly. Nejčastěji používané jsou kaolinitické, které vnášejí do směsi SiO₂ a Al₂O₃. Vápenec je nejvýhodnější surovinou, neboť zmíněné složky obsahuje již v ložisku.[13]

Vsázka obsahuje 76 až 78% CaCO₃; v případě, že je vysokoprocentní vápenec základní složkou, je potřeba provést korekci surovinou chudou na CaCO₃. Ta by měla obsahovat SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃ ve vhodném poměru (zvětralé partie a skrývka ložiska) Slínek by neměl obsahovat více než 6% hm. MgO, protože tato složka zapříčiňuje rozpínání po ztuhnutí cementu, což má za následek snížení pevnosti. Také přítomnost P₂O₅, PbO, ZnO aj. jsou nežádoucí.[13]

2.6.3 Složení surovinové směsi

Vlastnosti cementu závisí primárně z jeho chemického složení, ale také na úpravě slínku mletím a tepelném zpracováním (podmínkách vysokoteplotních reakcí), popřípadě přidavek dalších složek k cementu. [13]

Cílem je, aby zreagoval všechny CaO při tepelném zpracování na sloučeniny schopné hydraulického tuhnutí. Těchto sloučenin je pouze určitý počet a celý proces výroby, od sestavení směsi přes výpal, až po chladnutí musí být směřován tak, aby vznikaly následující sloučeniny: 3CaO.SiO₂ (C₃S), 2CaO.SiO₂ (C₂S), 3CaO.Al₂O₃ (C₃A) a 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ (C₄AF).[14]

Tento fakt se původně vyjadřoval empirickými pravidly, tzv. moduly, které charakterizovaly poměr daných složek ve směsi surovin, resp. Ve slínku (hmot. % oxidů)

Hydraulický modul:

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Silikátový modul:

$$M_S = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Hlinitanový modul:

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} [13]$$

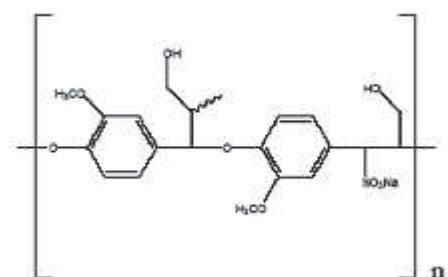
2.7 Superplastifikátory

Superplastifikátory jsou chemické modifikující přísady spolu s minerálními příměsemi v cementech (cem I až cem V dle normy EN 197 – 1) jsou schopny přípravy malt a betonů o požadovaných vlastnostech. [15]

Díky širokému sortimentu různých přísad máme možnost velkého výběru. Dnes se superplastifikátory považují za nepostradatelnou přísadu do všech typů betonů. Mezi nejvýznamější superplastifikátory dnes patří superplastifikátory na bázi polykarboxylátů, které nyní nahrazují superplastifikátory se sulfoskupinami. Karboxylová skupina díky rozvětvenosti umožňuje deformaci částic pojiva sterickeým efektem, takže je možné tyto superplastifikátory přidávat v desetinách % na množství pojiva. [15]

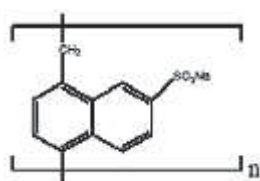
Rozdělení superplastifikátorů

Dle složení makromolekulárního řetězce rozlišujeme prakticky čtyři skupiny:



Obr. č. 3

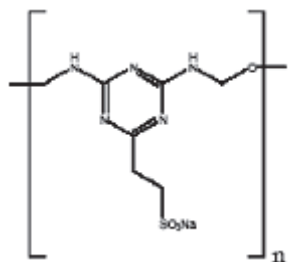
Lignosulfonáty (s nízkým obsahem sacharidů)



Obr. č. 4

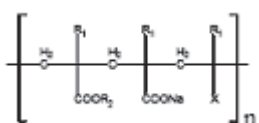
Polykondenzát naftalensulfonátu s formaldehydem (PNS):

Je potřeba, aby naftalen byl sulfonován do maximálního stupně a výsledný produkt obsahoval sulfoskupinu v β – poloze.



Obr. č. 5

Polykondenzát sulfonovaného melaminu s formaldehydem (PMS)



Obr. č.

Polykarboxyláty a polyakryláty

(tyto typy superplastifikátorů se řadí mezi polykarboxyláty)

V alkalickém prostředí cementových suspenzí, jsou funkční sulfoskupiny SO_3H a karboxylové skupiny COOH superplastifikátorů disociovány. Příslušné anionty reagují s kationty na povrchu zrn složek (Ca^{2+} , Al^{3+}) za tvorby komplexů. Určitá část iontů, které se neúčastní reakce na povrchu zrn dávají částicím negativní náboj s následným deflokulačním efektem. Přičemž rozhodující vliv udává délka a rozvětvení řetězce makromolekuly. [15]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Příprava vzorků pro pevnostní zkoušku

Byly připraveny směsi s různými poměry strusky a cementu na laboratorní míchačce. Tyto směsi o konsistenci pasty byly následně za použití vibračního stolu rovnoměrně rozprostřeny do forem. Přebytečná část byla odstraněna a formy pak byly ponechány 24 hodin zrání při laboratorní teplotě. Po jednom dni pak byly vzorky výjmuty z forem a uloženy ve vlhkém prostředí zrací komory. Na těchto vzorcích dále byly prováděny pevnostní zkoušky v časových intervalech 1, 7 a 28 dní.



Obr.č. 6:

Forma na přípravu zkušebních těles. (40x40x160 mm)

3.2 Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku

Byly připraveny trámečky o velikosti 20 mm x 20mm x 100mm. Pak bylo provedeno měření pevnosti v tlaku a pevnosti v ohybu. Pro stanovení těchto vlastností bylo využito přístroje s označením DESTTEST 4310 COMPACT A. Tento přístroj se skládá z lisů, lamaček, trhačky, skříně s hydraulickým agregátem a řídicí jednotky. Ke stanovení pevnosti v tlaku byl použit lis BS-300. Zkouška probíhala tak, že byl trámeček položen mezi dvě podložky. Při zkoušce se pak zaznamenávala tlaková síla v závislost na velikosti stlačení výšky trámečku. Základní veličina pevnost v tlaku je dána vztahem:

$$R_{Pd} = \frac{F_{Pd}}{S_0} \text{ [MPa]}, [16]$$

kde F_{Pd} je síla při porušení a S_0 původní průřez zkušebního tělesa.

Pro zkoušku pevnosti v ohybu byla použita lamačka BS-10. Proces stanovení mechanických vlastností postupoval následovně. Trámeček byl položen na pomocnou kovovou podložku s dvěmi oporami. Byl nastaven tak, aby lamačka působila silou přesně ve středu. Účelem zkoušky bylo získat závislost síly lamačky a průhybu trámečku. Za pevnost v ohybu se bere maximální hodnota tahového napětí působícího na povrch trámečku v okamžiku lomu. Hodnota smluvní pevnosti v ohybu R_{mo} je dána vztahem:

$$R_{mo} = \frac{M_0^{\max}}{W_0} \text{ [MPa]}, [16]$$

kde M_0^{\max} je maximální ohybový moment a W_0 je modul průřezu.

3.3 Měření vlhkosti

Bylo naváženo 100 g strusky. Kotelní struska byla rovnoměrně rozprostřena na fólii a dána do sušárny na dobu tří hodin při teplotě 180°C. Poté byla kotelní struska opět zvážena.

3.4 Rentgenová difrakční analýza

Difrakční analýza (XRD) je základní metodou k určování struktury pevných látek. Tato metoda je založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu.[17]

Rentgenové záření je formou elektromagnetického záření o vlnové délce 10^{-2} až 10^0 nm. Ozáření rentgenovým zářením z rentgenové trubice vznikají vakance, neboli mezery ve vnitřní elektronové slupce atomu. Tyto vakance jsou následně zaplňovány elektrony z vyšších energetických hladin za vyzáření charakteristického záření. Každá krystalická látka má sobě vlastní difraktogram. Na jehož základě jsme schopni identifikovat látku a dle intenzity jsme pak schopni určit i přibližné zastoupení látky ve vzorku.

Měření vychází z Braggova zákona:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

Kde d je mezivrstevná vzdálenost, θ je úhel dopadu a odrazu rentgenového záření. Číslo n udává pak řád reakce a λ je vlnová délka rentgenového záření.[18]



Obr.č.8

Rentgenový difraktometr Empyrean od firmy

3.5 Sítová analýza

Tato analýza je používána k rozdělení částic na základě jejich velikosti. Toto rozdělení se provádí na sítích poskládaných na sobě. Tato aparatura je pak zapnuta a za stálého vybovování zrna propadávají síty o příslušných velikostech ok na základě gravitace.[19]

4 VÝSLEDKY A DISKUSE

4.1 Použité suroviny

Cement 52,5 N – Mokrý

Kotelní struska

Superplastifikátory:

- CHRYSO Fluid optima 206, CHRYSO Chemie, s.r.o.

Na bázi modifikovaných polykarboxylátů

- CHRYSO Fluid CE 40 W, CHRYSO Chemie, s.r.o.

Na bázi polynaftalenu, bezchloridový

- CHRYSO Plast 760, CHRYSO Chemie, s.r.o.

Na bázi modifikovaných naftalenových polymerů

- CHRYSO fluid GT, CHRYSO Chemie, s.r.o.

Polymer ze skupiny polymelaminů

- CHRYSO fluid premia 330, CHRYSO Chemie, s.r.o.

Na bázi modifikovaných polykarboxylátů

Destilovaná voda

4.2 Měření vlhkosti

Po více jak dvou hodinách sušení kotelní strusky byly zjištěny tyto hodnoty:

Tabulka č.2.

Výsledky měření vlhkosti kotelní strusky

hmotnost vlhké strusky [g]	hmotnost suché strusky [g]	vlhkost %
100,02	63,95	36,07
100,12	63,89	36,23
100,08	63,78	36,3
100,09	63,7	36,39
průměrná vlhkost strusky		36,25

Z výsledků vyplývá, že vlhkost kotelní strusky byla 36%.

Vzhledem k vysokému obsahu H_2O v dodané kotelní strusce, byla struska vysoušena, aby byly zkoušky co nejvíce reprezentativní.

4.3 Rentgenová difrakční analýza

Z frakcí získaných síťovou analýzou byla dále zjišťována struktura a zastoupení fázového složení kotelní strusky. Měřeny byly frakce o velikostech částic: 5 mm; 2 mm; 1,6 mm; 0,5 mm; 0,4 mm, 0,063 mm a částice menší, než 0,063 mm.

Vysvětlivky k výsledkům fázové analýzy pomocí rentgenové difrakční analýzy

- (++++) fáze tvoří majoritní složku
- (+++) fáze přítomna ve značném množství
- (++) fáze přítomna v malém množství
- (+) fáze přítomna v minimálním množství
- (-) fáze není přítomna (1%)

Tabulkač.3.

Přibližné zastoupení jednotlivých fází ve frakcích s částicemi o různé velikosti

	5 mm	2 mm	1,6 mm	0,5 mm	0,4 mm	0,063 mm	>0,063 mm
TiO ₂	–	–	–	–	–	+	–
SiO ₂	++	++	++	++	+++	+++	++
Fe ₃ O ₄	–	+	–	+	–	+	+
Fe ₂ O ₃	+	+	+	+	–	+	+
Al ₂ SiO ₅	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
FeAl ₂ O ₄	–	+	+	+	+	+	–

Pozn.: mullit(Al₂SiO₅); Hercinit(FeAl₂O₄)

Z výsledků vidíme, že ve všech frakcích převládá fáze mullitu. Druhou nejvíce zastoupenou složkou je pak oxid křemičitý. Vyskytují se pak ještě další minoritní složky, nicméně jejich zastoupení je v minimálním množství.

Úplné difraktogramy jsou pak přiloženy v sekci přílohy.

4.4 Vliv přídatku PC v kompozitech na bázi kotelní strusky

Tyto experimenty si kladly za úkol zjistit jaký poměr kotelní strusky a portlandského cementu je nejvhodnější z hlediska mechanických vlastností. Tato kapitola popisuje složení testovacích směsí, dále jsou zde uvedena naměřená data a jejich grafické zpracování. Složení směsí je uvedeno v tabulce č.4, výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č.5 a v grafech č. 1,2.

Tabulka č.4.

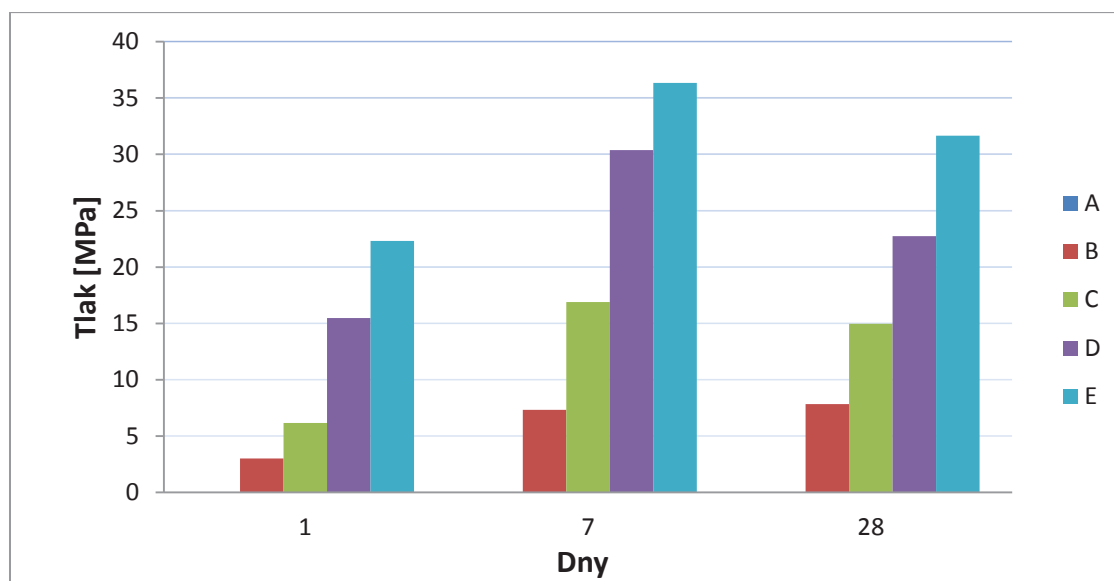
Hmotnostní zastoupení složek směsí

směs	A [10%]	B [20%]	C [30%]	D [40%]	E [50%]
Struska [g]	450	400	350	300	250
Cement [g]	50	100	150	200	250
voda [ml]	270	215	187	160	161

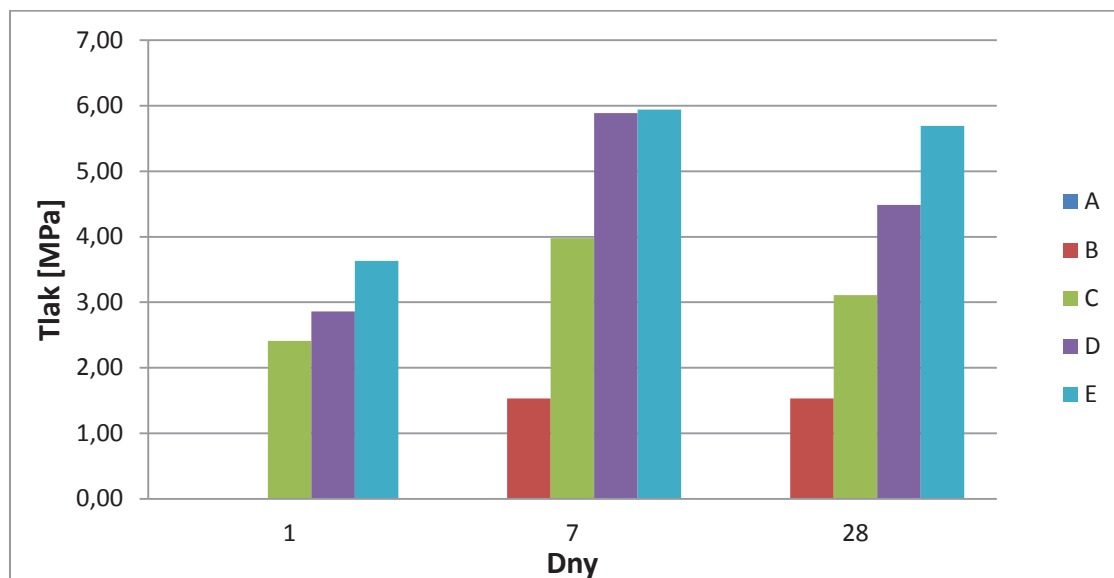
Tabulka č.5.

Naměřené mechanické vlastnosti směsí strusky a cementu

směs	stáří [dny]	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v ohybu [MPa]
A	1	0,00	0,00
	7	0,00	0,00
	28	0,00	0,00
B	1	3,02	0,00
	7	7,33	1,53
	28	7,84	1,53
C	1	6,16	2,41
	7	16,88	3,98
	28	14,96	3,11
D	1	15,47	2,86
	7	30,37	5,89
	28	22,73	4,49
E	1	22,31	3,63
	7	36,35	5,94
	28	31,67	5,70

**Graf č.1.**

Grafické znázornění vývoje pevností v tlaku v časové závislosti pro směsi bez plastifikátoru



Graf č.2.

Grafické znázornění vývoje pevností v tahu ohybem v časové závislosti pro směsi bez plastifikátoru

Zhodnocení

Z grafů pevností v tahu ohybem a v tlaku je jasně vidět rostoucí trend pevnosti v tlaku s rostoucím obsahem cementu. Tedy, že směs s 50 % zastoupení cementu vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti. Avšak žádná směs nedosahuje normalizované pevnosti samotné cementové pasty použitého cementu. Z tabulky č.4. lze pozorovat závislost množství strusky na množství záměsové vody.

4.5 Vliv typu superplastifikátorů na mechanické vlastnosti směsí

V této kapitole bylo cílem zjištění nejvhodnějšího superplastifikátoru. Bylo vybráno pět plastifikátorů, které se ve stejném množství přidávaly k směsi s označením *E*. Tedy kde zastoupení strusky a cementu bylo 50 % – 50 %. Bylo připraveno pět směsí, každá obsahující 2,5 g superplastifikátoru. Použité SP jsou specifikovány v sekci použité suroviny. Pro rychlý přehled jsou také uvedeny v tabulce č.7. Složení směsí je uvedeno v tabulce č.6. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č. 8 a v grafech č. 3,4.

Tabulka č.6.

Hmotnostní zastoupení složek směsí se superplastifikátory

směs	A	B	C	D	E
Struska [g]	250	250	250	250	250
Cement [g]	250	250	250	250	250
SP [1%]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
voda [g]	138,66	136,45	134	132	125,34

Tablka č.7

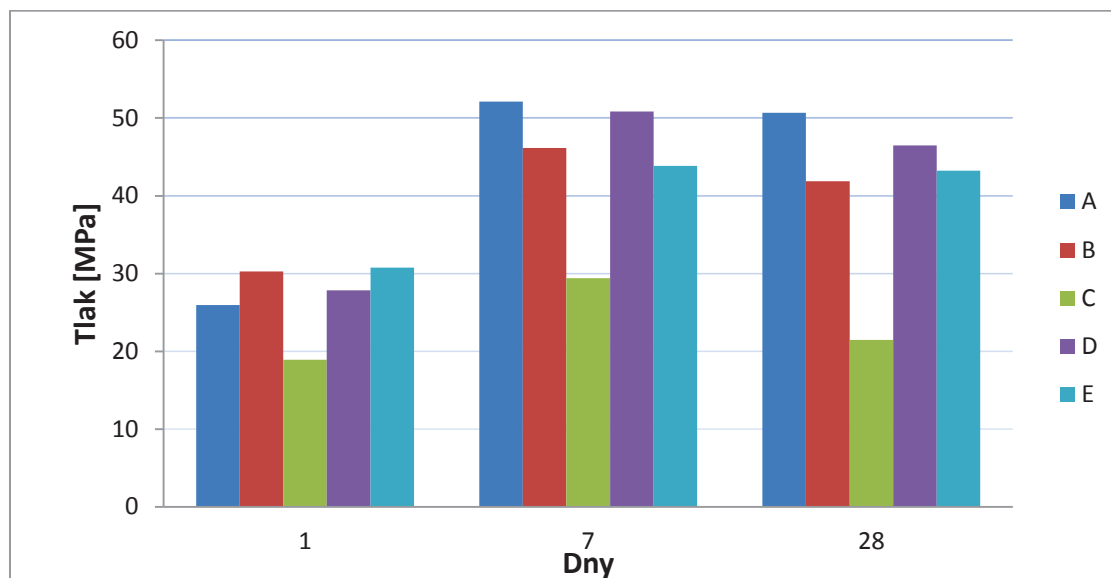
Vybrané plastifikátory

A	SP na bázi polykarboxylátů
B	SP na bázi polynaftalenu
C	SP na bázi naftalen. polymerů
D	SP ze skupiny polymelaminů
E	SP na bázi modif. polykarboxylátů

Tabulka č.8.

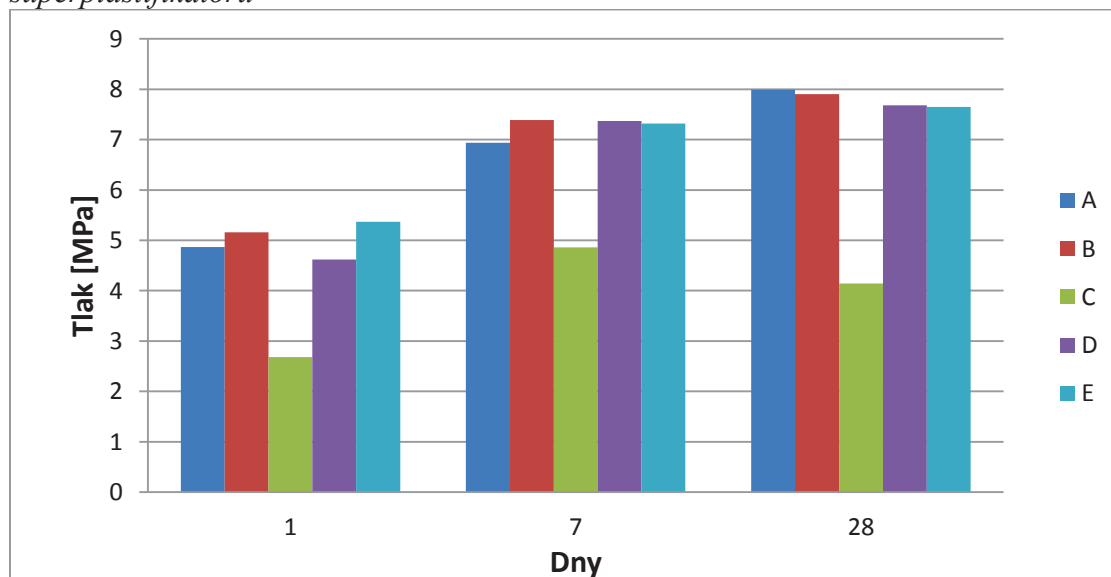
Naměřené mechanické vlastnosti směsí s různými druhy superplastifikátorů

směs	stáří [dny]	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v ohybu [MPa]
A	1	25,95	4,87
	7	52,13	6,94
	28	50,67	7,99
B	1	30,27	5,16
	7	46,16	7,39
	28	41,87	7,905
C	1	18,93	2,68
	7	29,4	4,86
	28	21,46	4,14
D	1	27,83	4,62
	7	50,83	7,37
	28	46,495	7,68
E	1	30,77	5,37
	7	43,86	7,32
	28	43,235	7,65



Graf č.3.

Grafické znázornění vývoje pevností v tlaku v časové závislosti pro směsi s vybranými typy superplastifikátorů



Graf č.4.

Grafické znázornění vývoje pevností v tahu ohybem v časové závislosti pro směsi s vybranými typy superplastifikátorů

Zhodnocení

Z grafů pozorujeme, že nejvyšších pevností po jednom dni dosáhl superplastifikátor E na bázi bolykaroxylátů. Tento SP pak vykazoval během dalších měření jedny z nejvyšších pevností. Byl proto vybrán pro přípravu následujících směsí. Dále můžeme pozorovat, že vývoj pevností v tlaku je oproti směsím bez superplastifikátoru stabilnější a mechanické vlastnosti se v rozmezí týdne a 28 dní mění minimálně. Je také vidět, že SP, které byly na bázi polykarboxylátů vykazují nejvyšších pevností. Naopak SP na bázi naftalenových polymerů dosahoval znatelně horších mechanických vlastností. Z připravených směsí nedosáhla požadovaných hodnot pevností ani jedna. Nejbližší tomu měla směs A se superplastifikátorem na bázi polykarboxylátů.

4.6 Vliv přídatku SP ve směsích s obsahem portlandského cementu 30 %

Následující kapitola studuje vliv množství přidaného superplastifikátoru ve směsích s obsahem 30 % hmot portlandského cementu. Následující experimenty studují vliv množství přidaného plastifikátoru na výsledné vlastnosti zatvrdlého kompozitu. Složení směsí je uvedeno v tabulce č.9, výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č.10 a v grafech č. 5,6.

Tabulka č.9.

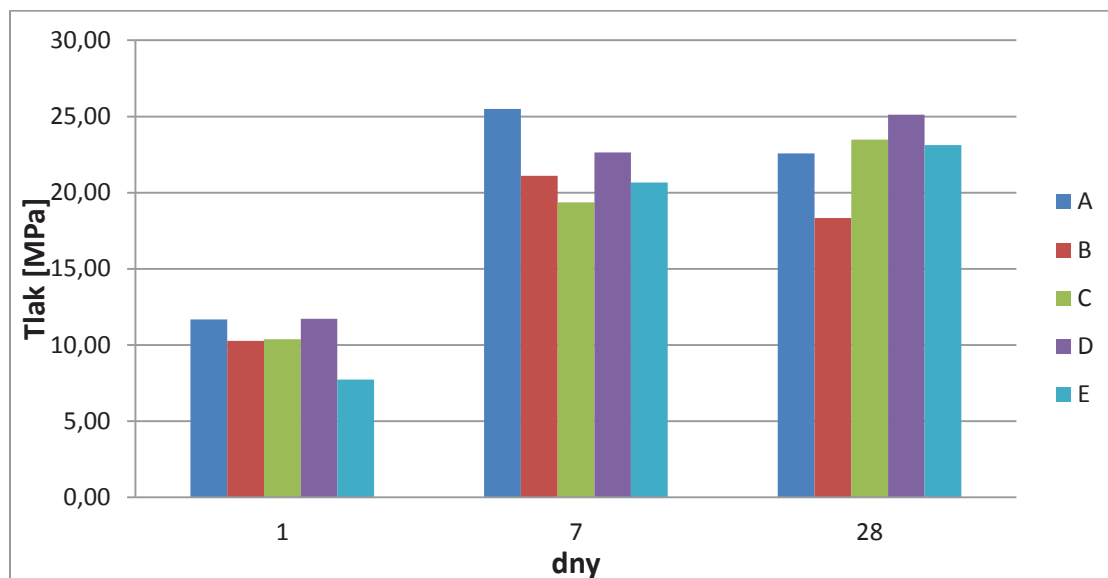
Hmotnostní zastoupení složek testovaných směsí s 30 % obsahem cementu a SP

	A	B	C	D	E
Struska [g]	350	350	350	350	350
cement [g]	150	150	150	150	150
SP [g]	0,15	0,75	1,5	3	4,5
voda [g]	181,34	178,89	169,03	159,85	159,12

Tabulka č.10.

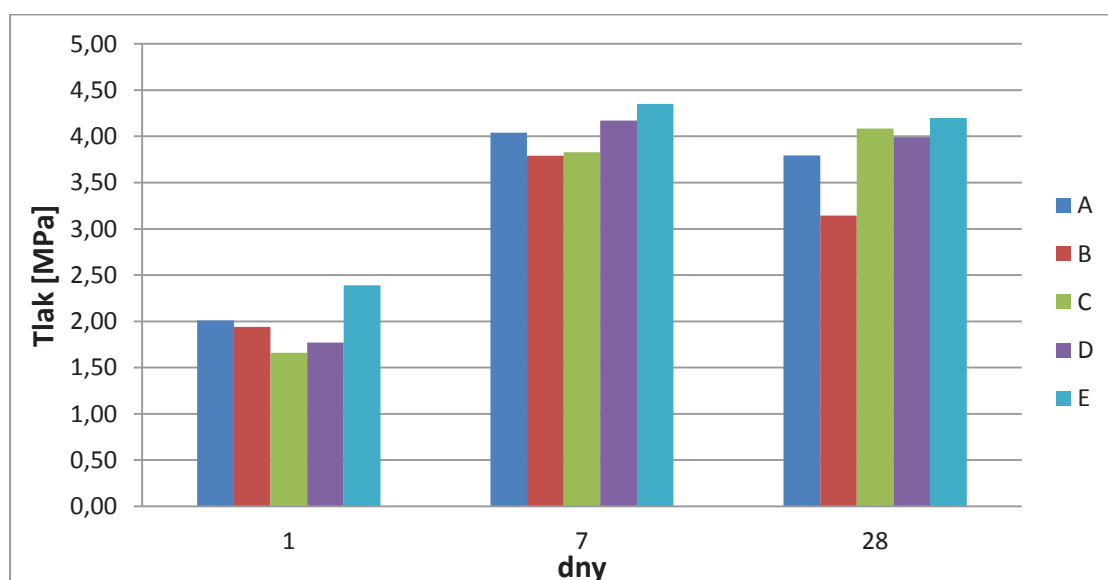
Naměřené mechanické vlastnosti směsí s 30 % obsahem cementu s plastifikátorem

směs C [30%]	stáří [dny]	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v ohybu [MPa]
A	1	11,67	2,01
	7	25,50	4,04
	28	22,58	3,80
B	1	10,28	1,94
	7	21,10	3,79
	28	18,33	3,15
C	1	10,38	1,66
	7	19,36	3,83
	28	23,49	4,09
D	1	11,72	1,77
	7	22,63	4,17
	28	25,12	3,99
E	1	7,72	2,39
	7	20,67	4,35
	28	23,13	4,20



Graf č.5.

Grafické znázornění vývoje pevností v tlaku v časové závislosti pro směs s 30 % obsahem cementu s plastifikátorem



Graf č.6.

Grafické znázornění vývoje pevností v tahu ohybem v časové závislosti pro směs s 30 % obsahem cementu s plastifikátorem

Zhodnocení

Z grafu pevností je vidět, že nejhůře obstála směs s 0,5% (vzhledem k množství cementu) superplastifikátoru. Lze pozorovat, že směsi měly mírný trend po 28 dnech ztrácet pevnost. V porovnání s původní pevností v tlaku, kde nebyl použit superplastifikátor je ovšem vidět znatelný nárůst cca o 50 %. Pevnost se v průměru při každém z měření zvýšila nejméně o 4 MPa. Největší rozdíl je pak v pevnosti v tlaku po 28 dnech, kde rozdíl tvoří v průměru 7 MPa. Při srovnání vývoje pevností v tahu ohybem je vidět, že směs bez SP má po jednom dni vyšší pevnost, nicméně v měření po 28 dnech má směs se SP vyšší hodnoty pevností.

4.7 Vliv přídatku SP ve směsích s obsahem portlandského cementu 40 %

Následující kapitola studuje vliv množství přidaného superplastifikátoru ve směsích s obsahem 40 % hmot portlandského cementu. Následující experimenty studují vliv množství přidaného plastifikátoru na výsledné vlastnosti zatvrdlého kompozitu. Složení směsí je uvedeno v tabulce č.11, výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č.12 a v grafech č. 7,8.

Tabulka č.11

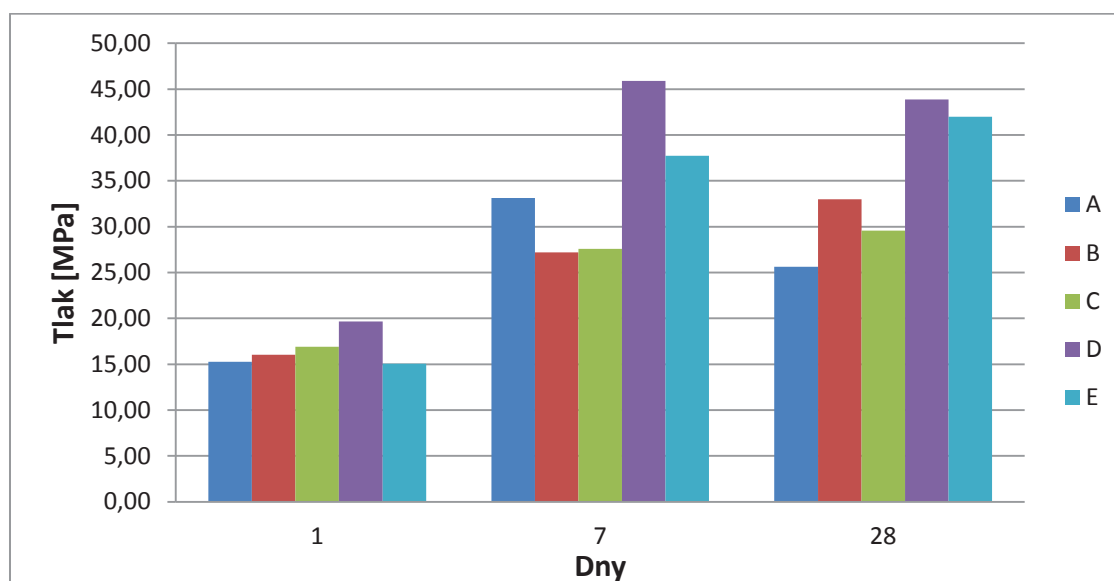
Hmotnostní zastoupení složek testovaných směsí s 40 % obsahem cementu a SP

	A	B	C	D	E
Struska [g]	300	300	300	300	300
cement [g]	200	200	200	200	200
SP [g]	0,2	1	2	4	6
voda [g]	173,3	154,62	147,34	135,84	133,2

Tabulka č.12

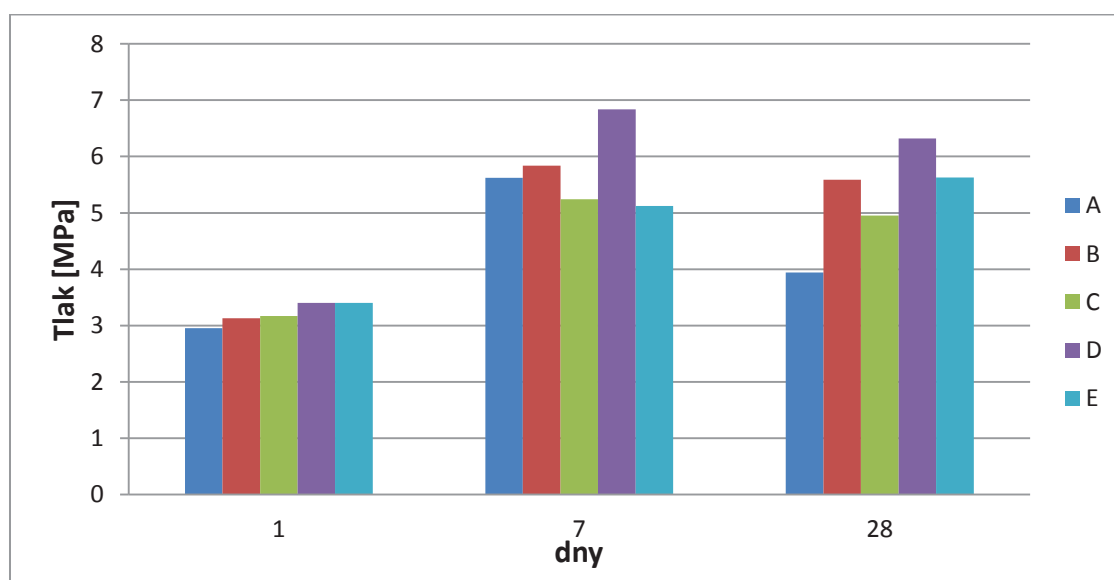
Naměřené mechanické vlastnosti směsí s 40 % obsahem cementu s plastifikátorem

směs D [40%]	stáří [dny]	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v ohybu [MPa]
A	1	15,29	2,95
	7	33,13	5,62
	28	25,64	3,94
B	1	16,04	3,13
	7	27,21	5,84
	28	33,00	5,59
C	1	16,90	3,17
	7	27,57	5,24
	28	29,59	4,95
D	1	19,67	3,4
	7	45,91	6,84
	28	43,87	6,32
E	1	15,08	3,4
	7	37,73	5,12
	28	41,98	5,63



Graf č.7.

Grafické znázornění vývoje pevností v tlaku v časové závislosti pro směs s 40 % obsahem cementu s plastifikátorem



Graf č.8.

Grafické znázornění vývoje pevností v tahu ohybem v časové závislosti pro směs s 40 % obsahem cementu s plastifikátorem

Zhodnocení

Z grafů pozorujeme, že směs D, která obsahuje 2 % plastifikátoru dosahuje nejvyšších hodnot pevností, a to jak v tlaku, tak i v pevnosti tahu ohybem. Je také opět vidět tendence snížení mechanických vlastností ve zkoušce po 28 dnech. V porovnání se stejnou směsí bez superplastifikátoru vidíme, že se pevnost v tlaku zvýšila jen u směsí s obsahem více než 2% SP. (směs D – 4 g a směs E – 6 g). Normalizovaných hodnot pevnosti v tlaku však nedosáhla žádná z připravených směsí. Při srovnání vývoje pevností v tahu ohybem je vidět, že směs se SP dosahuje vyšších hodnot v měření po 1 a 28 dnech.

4.8 Vliv přídatku SP ve směsích s obsahem portlandského cementu 50 %

Následující kapitola studuje vliv množství přidaného superplastifikátoru ve směsích s obsahem 50 % hmot portlandského cementu. Následující experimenty studují vliv množství přidaného plastifikátoru na výsledné vlastnosti zatvrdlého kompozitu. Složení směsí je uvedeno v tabulce č.13, výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č.14 a v grafech č. 9,10.

Tabulka č.13.

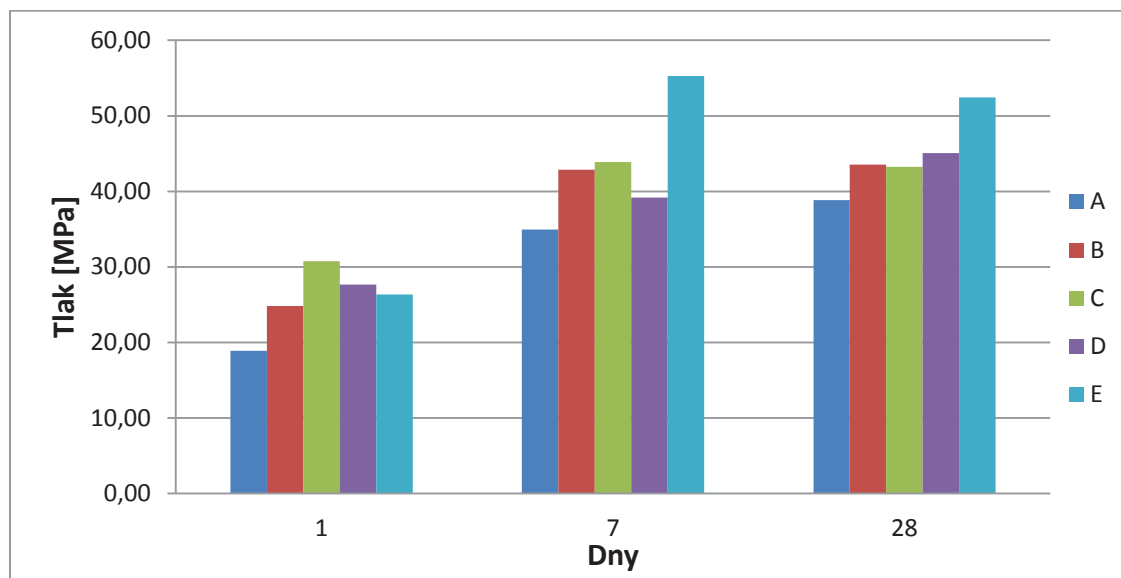
Hmotnostní zastoupení složek testovaných směsí s 50 % obsahem cementu a SP

	A	B	C	D	E
Struska [g]	250	250	250	250	250
cement [g]	250	250	250	250	250
SP [g]	0,25	1,25	2,5	5	7,5
voda [g]	157,26	145,9	125,34	122,82	111,08

Tabulka č.14.

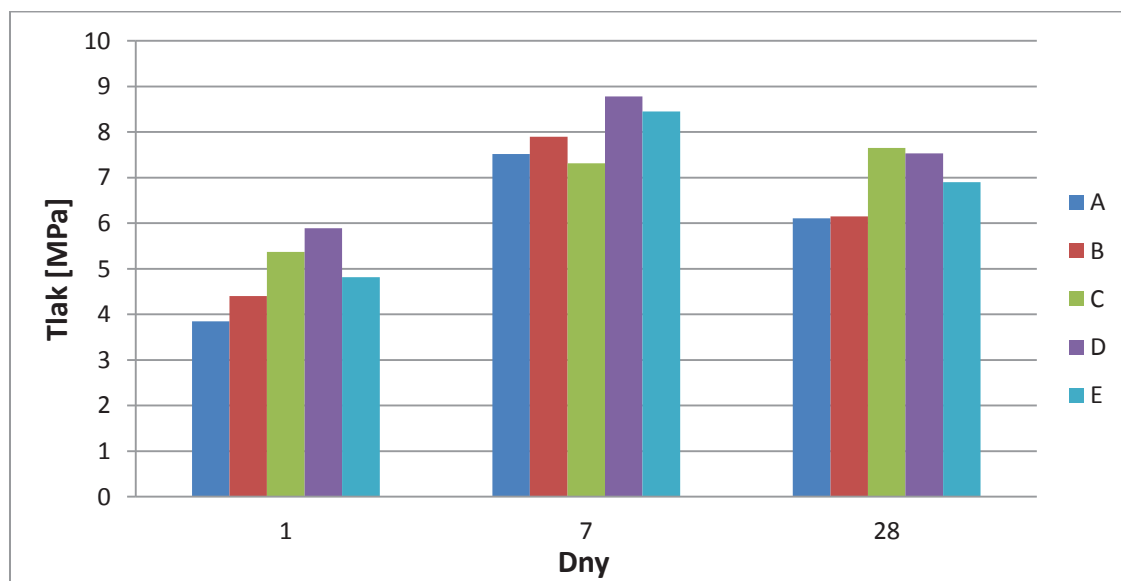
Naměřené mechanické vlastnosti směsí s 50 % obsahem cementu s plastifikátorem

směs E [50%]	stáří [dny]	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v ohybu [MPa]
A	1	18,90	3,85
	7	34,93	7,52
	28	38,84	6,11
B	1	24,84	4,4
	7	42,85	7,9
	28	43,56	6,15
C	1	30,77	5,37
	7	43,86	7,315
	28	43,24	7,65
D	1	27,67	5,89
	7	39,17	8,78
	28	45,06	7,53
E	1	26,35	4,82
	7	55,30	8,45
	28	52,45	6,9



Graf č.9.

Grafické znázornění vývoje pevností v tlaku v časové závislosti pro směs s 50 % obsahem cementu s plastifikátorem



Graf č.10.

Grafické znázornění vývoje pevností v tahu ohybem v časové závislosti pro směs s 50 % obsahem cementu s plastifikátorem

Zhodnocení

Z grafu pevností jde vidět, že nejnižších hodnot dosáhla směs A s 0,1 % superplastifikátoru. Na druhé straně směs s nejvyšším zkoumaným obsahem SP tedy směs E s 3 % vykazovala po 28 dnech nejvyšší pevnost v tlaku. Tato směs také jako jediná ze všech připravených směsí dosáhla normalizovaných hodnot pevnosti v tlaku pro portlandský cement tř. 52,5 N. Z grafu pevnosti v tahu ohybem pozorujeme nejvyšší hodnoty po 28 dnech u směsi C s 1% SP. Jako jediná ze směsí vykazovala rostoucí trend. Ostatní směsi pak projevovaly tendenci ztrácet pevnost v tahu ohybem v rozmezí 7 až 28 dne. V porovnání s počáteční směsí bez superplastifikátoru lze jasně vidět nárůst pevnosti v tlaku až 20 MPa při měření po 28 dnech.

Bakalářská práce se zabývá studiem využití kotelní strusky. Kotelní struska, běžně označovaná jako škvára, je sekundární surovinou. Její využití je v dnešní době omezené, a proto se hledá její další možné uplatnění. Tato práce se zejména zabývá testy mechanických vlastností, především pevnostmi v tlaku a v tahu ohybem na připravených zkušebních trámečkách.

V experimentální části bylo připraveno pět směsí na bázi kotelní strusky a portlandského cementu. Každá směs obsahovala jiné procentuální zastoupení daných složek. Žádná z připravených směsí sice nedosahovala pevností, jež ukládá norma pro použitý portlandský cement, avšak pevnosti byly velice dobré, například směs s obsahem 30 % portlandského cementu dosahovala po jednom dni zrání pevnost v tlaku více než 6 MPa a po 28 dnech téměř 15 MPa.

Následně byly testovány různé druhy superplastifikátorů ve směsích s kotelní struskou a cementem. Jako nejvhodnější se ukázaly plastifikátory na bázi polykarboxylátů a v dalších experimentech již bylo pracováno pouze s polykarboxyláty. Byl testován vliv přidaného množství plastifikátoru na mechanické vlastnosti připravených kompozitů při různém obsahu portlandského cementu. U směsí s obsahem cementu 50 % hmot. bylo dosaženo více než 7 MPa v tahu ohybem a více než 50 MPa v tlaku. Ostatní směsi s nižším obsahem cementu dosahovali pevností v tlaku v rozmezí 20 – 45 MPa. Lze tedy konstatovat, že se vzrůstajícím množstvím cementu rostou i pevnosti. Jako optimální přídavek plastifikátoru bylo stanoveno množství v intervalu 1 – 2 % plastifikátoru na množství pojiva (cementu), přídavek byl rovněž ovlivněn množstvím strusky, neboť měla poměrně velký měrný povrch.

Zajímavým zjištěním byla skutečnost, že již po jednom dni zrání bylo dosaženo velice dobrých pevností a to i u směsí s 30 % cementu, kde se pohybovaly pevnosti v tlaku mírně nad 10 MPa, u směsí s obsahem 40 % cementu to bylo více než 15 MPa a pro směsi s 50 % cementu více než 30 MPa při použití optimálního množství plastifikátoru. To by mohlo být využito například v betonárnách, kde je potřeba získat po krátké době dostatečné pevnosti, aby mohly být výrobky odformovány.

Práce prokázala, že kotelní struska (škvára) může být dobrou surovinou v kombinaci s portlandským cementem a plastifikátorem. Do budoucna by bylo vhodné tento materiál dále zkoumat a testovat jeho uplatnění i v jiných odvětvích, například díky vysokému obsahu mulitu jako složku žařomateriálů.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] International Energy Statistics. *Energy Information Administration* [online]. [cit. 2013-05-03].
- [2] Využití uhlí. *Institut geologického inženýrství, VŠB-TU Ostrava; Geologie, Studium, Mineralogie, Geology, Mineralogy* [online]. [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyuziti_uhli.html#literatura
- [3] *Kompozitní materiály na bázi tuhých zbytků fluidního spalování*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta chemická, ústav materiálů.
- [4] Tuhé zbytky fluidního spalování uhlí jako efektivní pojivo. In: *Tuhé zbytky fluidního spalování uhlí jako efektivní pojivo* [online]. 14.4.2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tuhe-zbytky-fluidniho-spalovani-uhli-jako-efektivni-pojivo>
- [5] *Odsiřování*. 29.11.2011. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Ochrana%20ovzdusi/Odsirovani.pdf>
- [6] *Znečišťování ovzduší a energetika*. 24.9.2007. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchop/velebudice/ovzdusi/energetika.htm>
- [7] *Ochrana ovzduší*. 23.6.2006. Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~lih90/_soubory/oo/10-01.pdf
- [8] *Redukce NOx ve spalínách*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav procesního a ekologického inženýrství.
- [9] Mi-Soo S., Hey-Suk K., Dong-Soon J.: Numerical study on the SNCR application of space-limited industrial boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2007, no. 27, pp.2850-2857. Zveřejněno dne 10.5.2007. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com>>
- [10] *Možnosti využívání odpadů z energetiky* [online]. 2010 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.6.7
- [11] *Struska pro otrýskávání* [online]. [2013] [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.mineraldekor.cz/14-struska/>
- [12] *Boiler slag*. Colorado, 2004. Dostupné z: <http://www.resourcesaver.org/ewebeditpro/items/O130F10109.pdf>
- [13] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. upravené vydání. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1988. 520 s.
- [14] *Sanace betonových podlah alkalicou cestou*. Brno, 2011. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3184/Sanace%20betonov%C3%BDch%20podlah.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie, technologie a vlastností materiálu.
- [15] *Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete*. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1998, Volume 20, Issues 2–3 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946598000717>
- [16] *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Cerm, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [17] Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích. *Chempoint* [online]. 24.03.2011 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovych-vzorcich>
- [18] *Rentgenová spektroskopie a difrakce*. 8.12.2006. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_421.pdf
- [19] *Sítová analýza*. *Chempoint* [online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/sitova-analyza>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SP	Superplastifikátor
PC	Portlandský cement

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti nad 5 mm.

Příloha 2:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 2 mm až 5 mm.

Příloha 3:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 1,6 mm až 2 mm.

Příloha 4:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 0,5 mm až 1,6 mm.

Příloha 5:

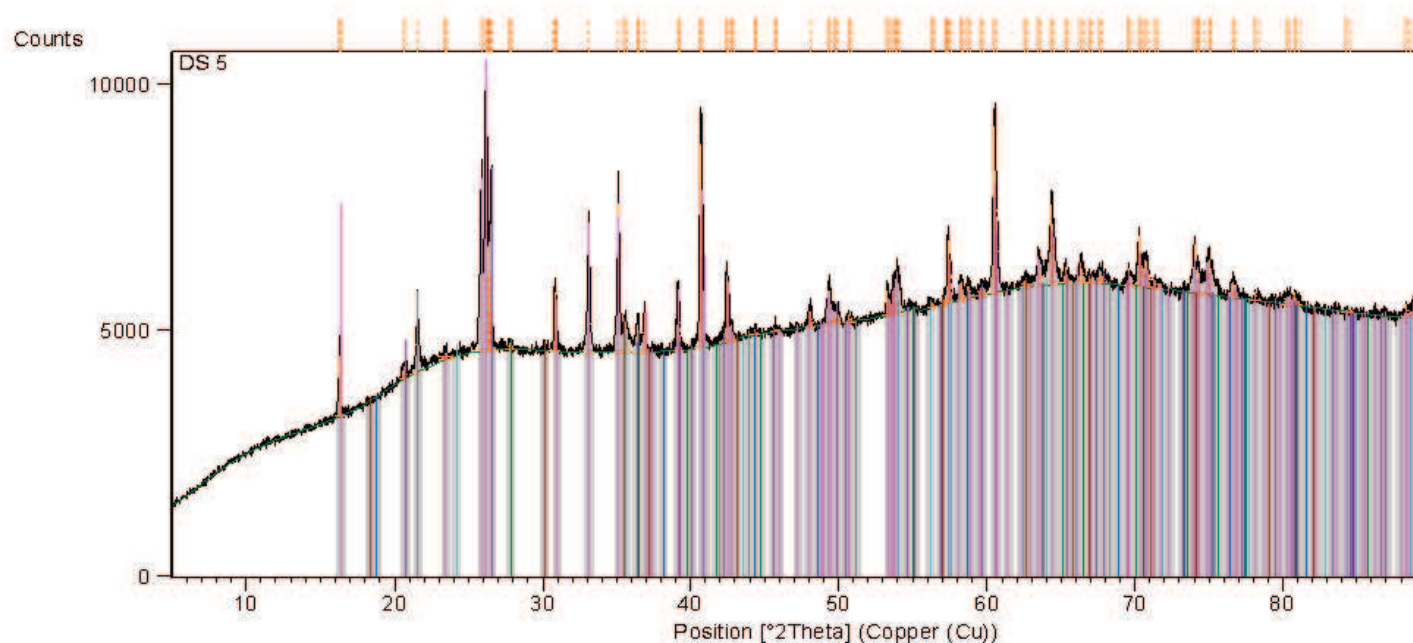
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 0,4 mm až 0,5 mm.

Příloha 6:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 0,063 mm až 0,4 mm.

Příloha 7:

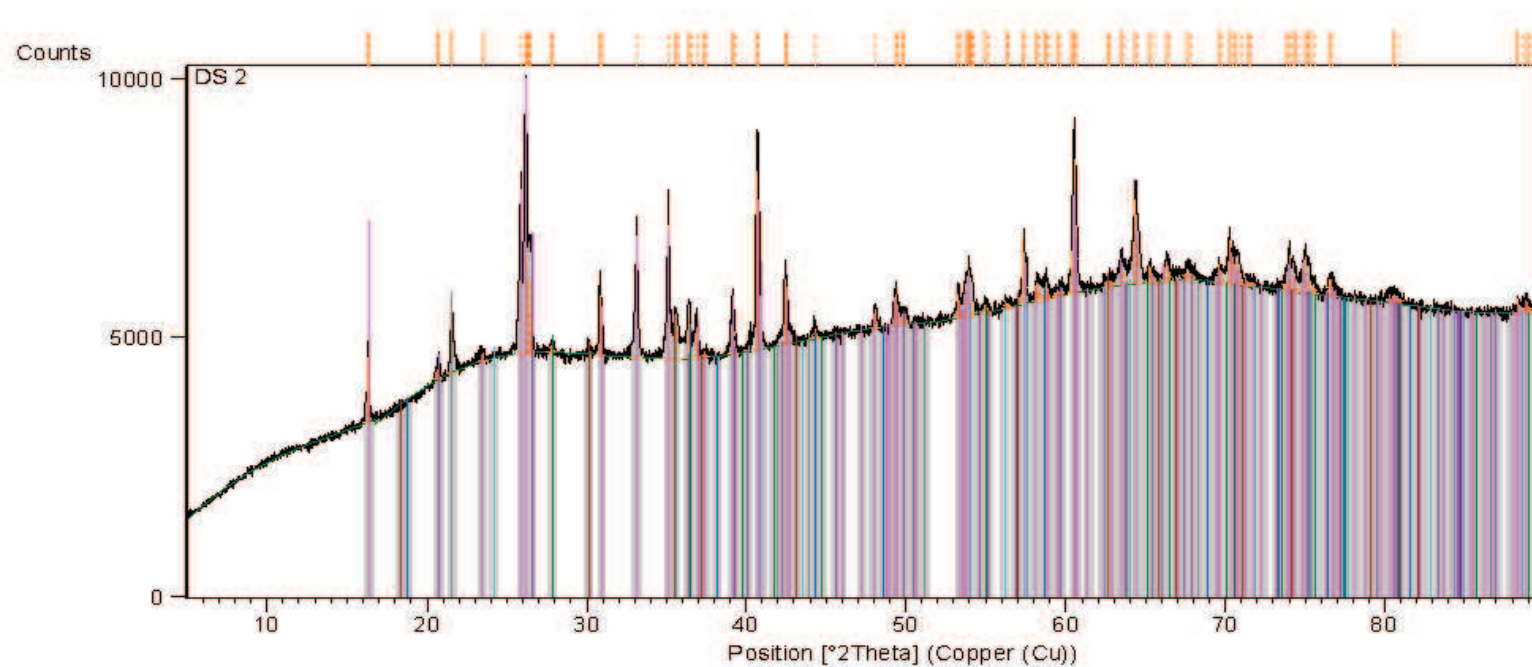
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti menší než 0,063 mm.



Peak List
(Fe _{0.867} Al _{0.133}) (Fe _{0.235} Al _{1.765}) O ₄ ; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn; SQ: 1 [%]; Cubic; Fd-3m
Ti O ₂ ; Titanium Oxide; Rutile, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; P42/mmm
Si O ₂ ; Silicon Oxide; Cristobalite beta high; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe ₃ O ₄ ; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 1 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe ₂ O ₃ ; Iron Oxide; Hematite, syn; SQ: 2 [%]; Rhombohedral; R-3c
Al (Al _{0.69} Si _{1.22}) O _{4.85} ; Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn; SQ: 79 [%]; Orthorhombic; Pbam
Si O ₂ ; Silicon Oxide; SQ: 13 [%]; Hexagonal; P321

Příloha 1:

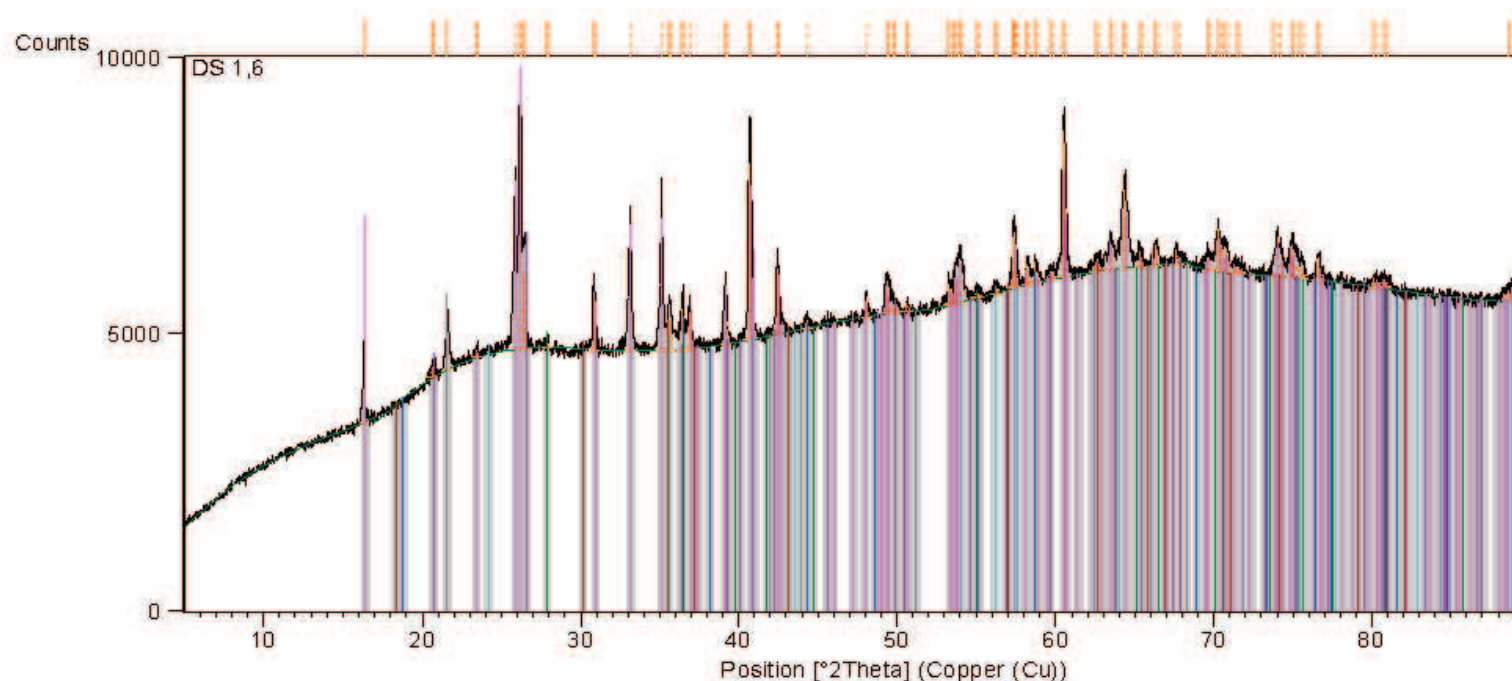
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti nad 5 mm.



Peak List
(Fe0.867 Al0.133) (Fe0.235 Al1.765) O4; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Ti O2; Titanium Oxide; Rutile, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; P42/mnm
Si O2; Silicon Oxide; Cristobalite beta high; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe3 O4; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe2 O3; Iron Oxide; Hematite, syn; SQ: 2 [%]; Rhombohedral; R-3c
Al (Al69 Si1.22 O4.85); Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn; SQ: 80 [%]; Orthorhombic; Pbam
Si O2; Silicon Oxide; SQ: 9 [%]; Hexagonal; P321

Příloha 2:

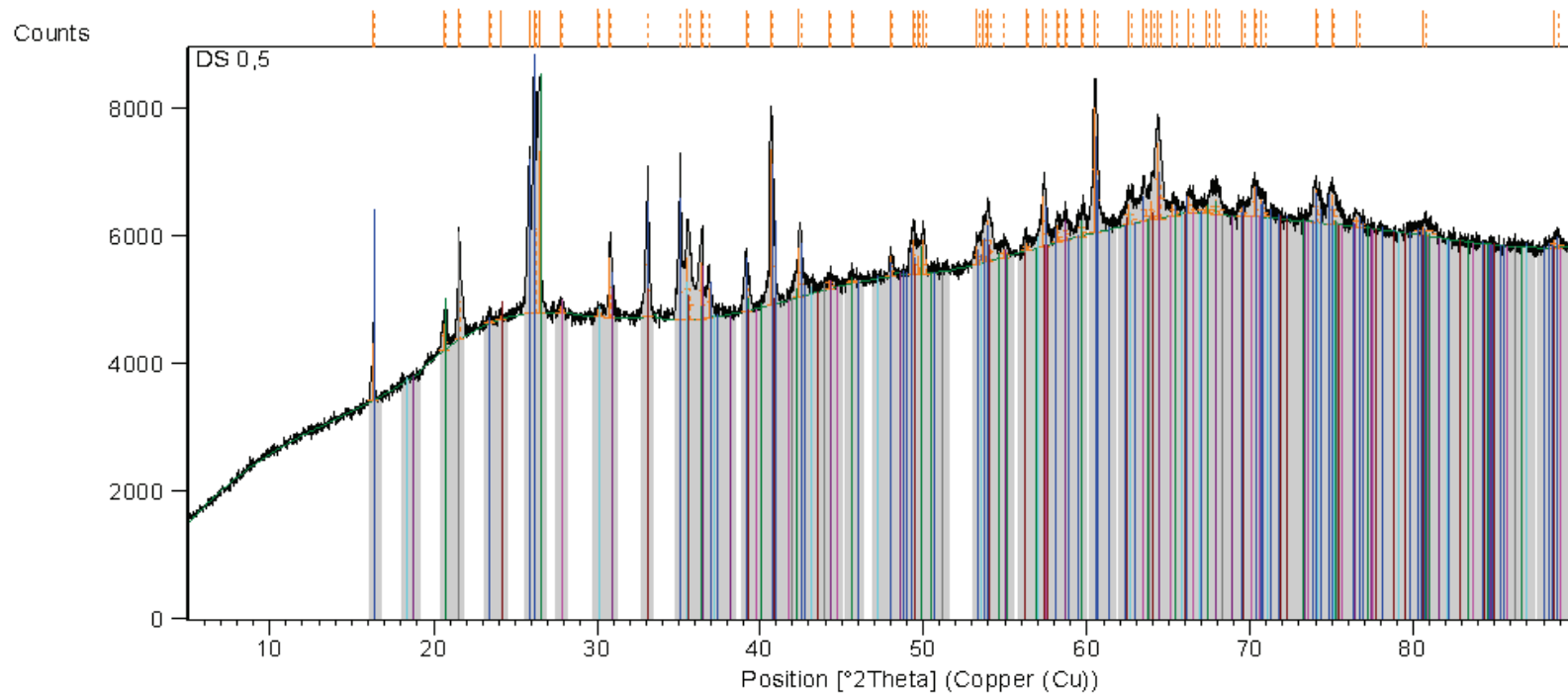
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 2 mm až 5 mm.



Peak List
(Fe0.867 Al0.133) (Fe0.235 Al1.765) O4; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn; SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Ti O2; Titanium Oxide; Rutile, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; P42/mnm
Si O2; Silicon Oxide; Cristobalite beta high; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe3 O4; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 1 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe2 O3; Iron Oxide; Hematite, syn; SQ: 2 [%]; Rhombohedral; R-3c
Al (Al.59 Si1.22 O4.85); Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn; SQ: 82 [%]; Orthorhombic; Pbam
Si O2; Silicon Oxide; SQ: 9 [%]; Hexagonal; P321

Příloha 3:

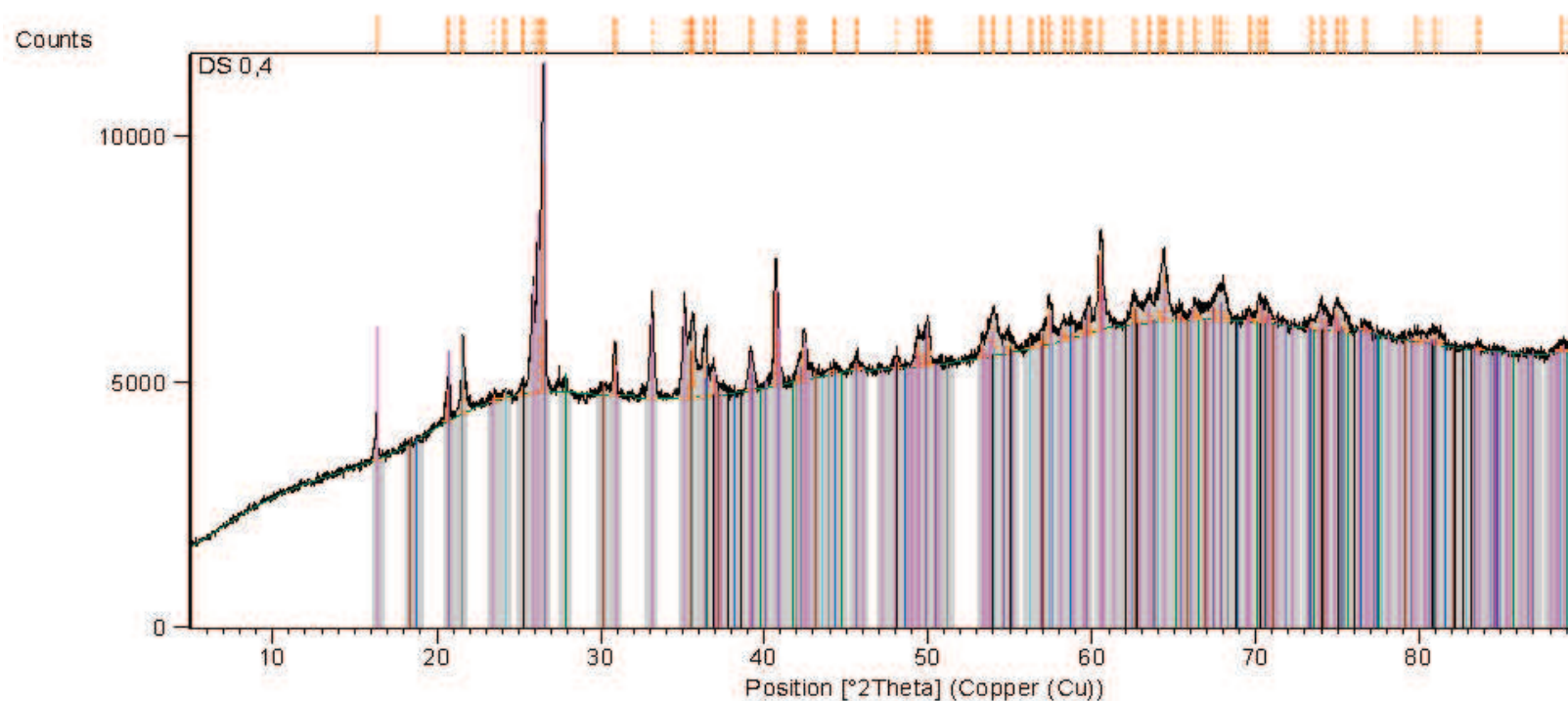
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 1,6 mm až 2 mm.



Peak List
Al (Al.69 Si1.22 O4.85); Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn; SQ: 71 [%]; Orthorhombic; Pbam
Si O2; Silicon Oxide; SQ: 17 [%]; Hexagonal; P3221
Si O2; Silicon Oxide; Cristobalite beta high; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe2 O3; Iron Oxide; Hematite, syn; SQ: 2 [%]; Rhombohedral; R-3c
Fe3 O4; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Ti O2; Titanium Oxide; Rutile, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; P42/mnm
(Fe0.867 Al0.133) (Fe0.235 Al1.765) O4; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn; SQ: 4 [%]; Cubic; Fd-3m

Příloha 4:

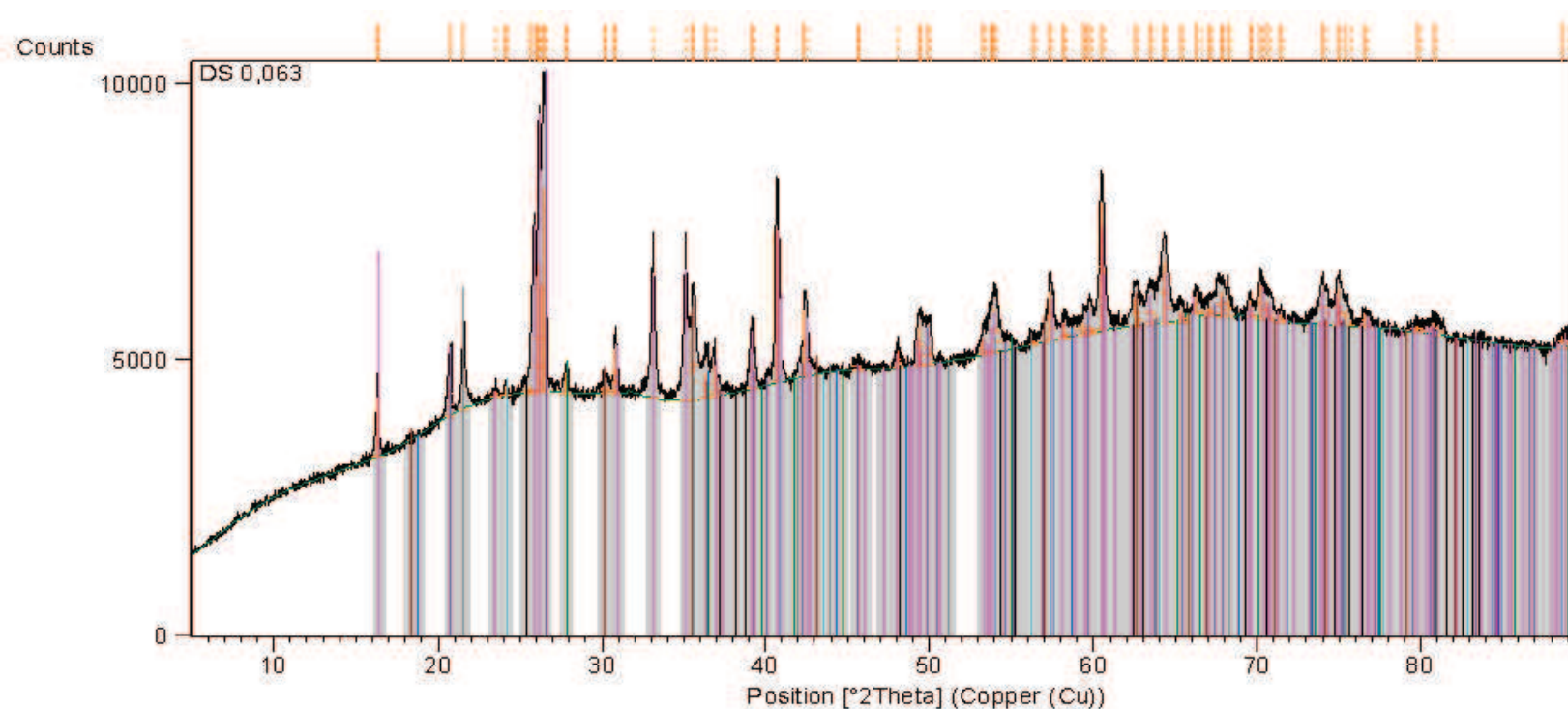
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 0,5 mm až 1,6 mm.



Peak List
(Fe0.867 Al0.133) (Fe0.235 Al1.765) O4; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Ti O2; Titanium Oxide; Rutile, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; P42/mnm
Si O2; Silicon Oxide; Cristobalite beta high; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe3 O4; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe2 O3; Iron Oxide; Hematite, syn; SQ: 1 [%]; Rhombohedral; R-3c
Al (Al69 Si1.22 O4.85); Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn; SQ: 59 [%]; Orthorhombic; Pbam
Si O2; Silicon Oxide; SQ: 29 [%]; Hexagonal; P3221
Ti O2; Titanium Oxide; Anatase, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; I41/amd

Příloha 5:

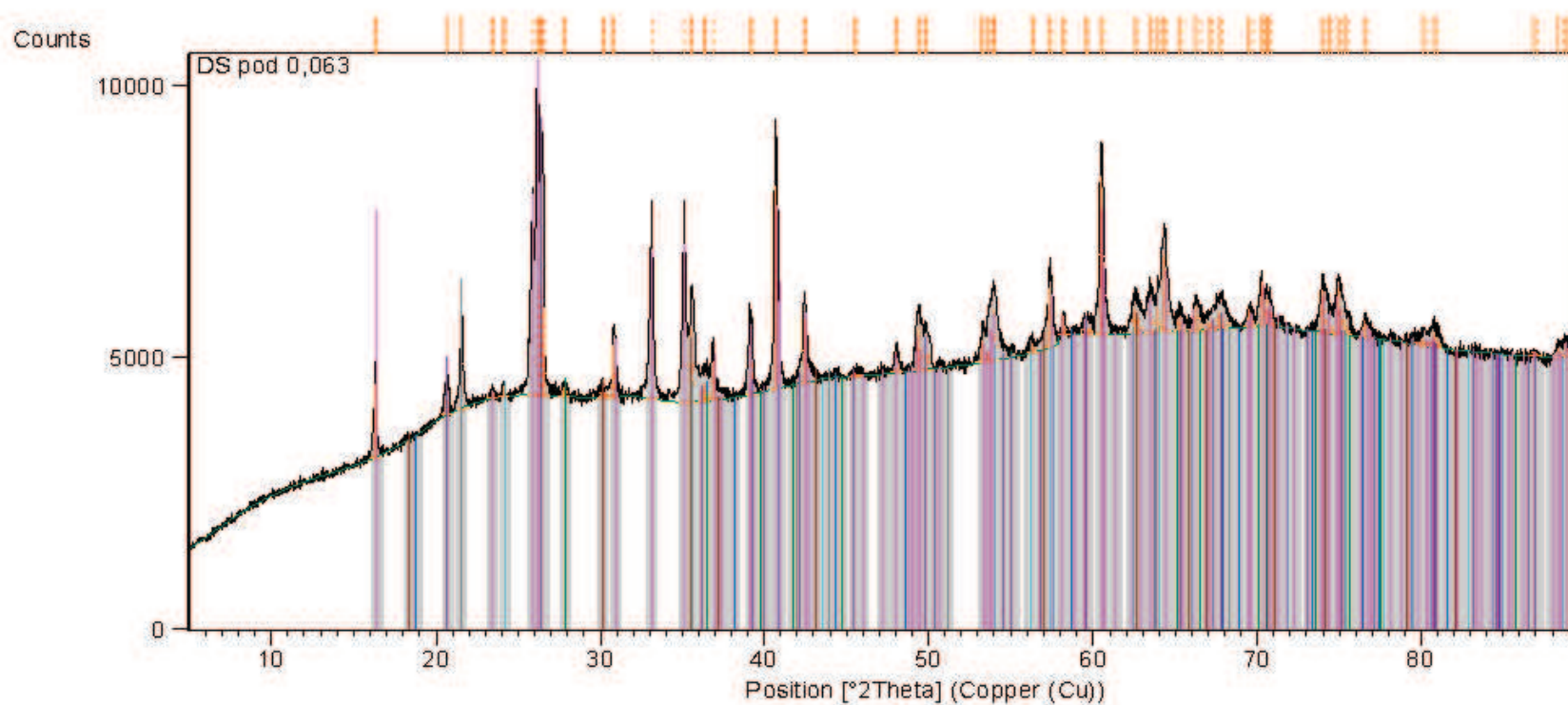
Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 0,4 mm až 0,5 mm.



Peak List
(Fe0.867 Al0.133) (Fe0.235 Al1.765) O4; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn; SQ: 2 [%]; Cubic; Fd-3m
Ti O2; Titanium Oxide; Rutile, syn; SQ: 2 [%]; Tetragonal; P42/mnm
Si O2; Silicon Oxide; Cristobalite beta high; SQ: 3 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe3 O4; Iron Oxide; Magnetite; SQ: 4 [%]; Cubic; Fd-3m
Fe2 O3; Iron Oxide; Hematite, syn; SQ: 2 [%]; Rhombohedral; R-3c
Al (Al69 Si1.22 O4.85); Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn; SQ: 67 [%]; Orthorhombic; Pbam
Si O2; Silicon Oxide; SQ: 21 [%]; Hexagonal; P321
Ti O2; Titanium Oxide; Anatase, syn; SQ: 1 [%]; Tetragonal; I41/amd

Příloha 6:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti mezi 0,063 mm až 0,4 mm.



Peak List
(Fe _{0.867} Al _{0.133}) (Fe _{0.235} Al _{1.765}) O ₄ ; Iron Aluminum Oxide; Hercynite, syn, SQ: 1 [%]; Cubic, Fd-3m
Ti O ₂ ; Titanium Oxide; Rutile, syn, SQ: 1 [%]; Tetragonal, P42/mnm
Si O ₂ ; Silicon Oxide; Cristobalite beta high, SQ: 3 [%]; Cubic, Fd-3m
Fe ₃ O ₄ ; Iron Oxide; Magnetite, SQ: 2 [%]; Cubic, Fd-3m
Fe ₂ O ₃ ; Iron Oxide; Hematite, syn, SQ: 2 [%]; Rhombohedral, R-3c
Al (Al _{0.69} Si _{1.23} O _{4.85}); Aluminum Silicon Oxide; Mullite, syn, SQ: 74 [%]; Orthorhombic, Pbam
Si O ₂ ; Silicon Oxide, SQ: 16 [%]; Hexagonal, P3221

Příloha 7:

Analýza fázového složení kotelní strusky pro částice o velikosti menší než 0,063 mm.